

**Psychophysik willkürlicher Bewegungen:**

**Kinästhesie der Geschwindigkeit**

Eine neuartige Methode  
zur erstmaligen Erhebung von Unterschiedsschwellen  
in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit  
von willkürlich ausgeführten Armbewegungen

Inaugural - Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von  
Stefan Müller

Düsseldorf  
2001

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. E.R. Wist  
Koreferent: Prof. Dr. A. Buchner

Tag der mündlichen Prüfung: 26.11.2001

---

"In short, the evident fact that man is not merely perceptive and intellectual, but distinctly active or reactive, is being pushed to a position in our study more worthy of its fundamental importance...

it is somewhat surprising that the subject of movement has received so little attention from one of the great departments of psychological research. We have as yet no psychophysics of the voluntary movements. By this I mean that we have no large mass of detailed study into the normal relations of voluntary movement to consciousness...

It is not the movement as produced, but as perceived, that has been the object of study...

Movement enters consciousness not only as perceived, but as intended...

And especially we must endeavor to study the arc as a unit, to trace cause and effect from sense stimulus to muscular response. And we should do this not simply in cases of involuntary response, but in cases of voluntary action..."

**From: Woodworth, R.S. (1899)**

**The accuracy of voluntary movement.**

**Introduction.**

**The Psychological Review. Monograph Supplements. Vol. III., Ch. XIII.**

**Reprint: McMillan Company, New York (1970).**

---

---

# Gliederung

---

## ZUSAMMENFASSUNG

### 1. EINLEITUNG

#### **1.1 Kinästhesie der Geschwindigkeit**

Kinästhesie  
Kinästhesie und Propriozeption  
Untersuchungen zur Kinästhesie

#### **1.2 Neuronale Grundlagen**

Kinästhesie und somatosensorische Mechanorezeptoren  
Muskelspindeln  
Golgi-Sehnenrezeptoren  
Gelenkrezeptoren  
Aufsteigende Bahnen und subkortikale Verarbeitung  
Kortikale Verarbeitung

#### **1.3 Kinästhesie versus Stellungssinn**

#### **1.4 Kinästhesie aktiver Bewegungen**

#### **1.5 Psychophysik willkürlicher Bewegungen: Experimente 1, 2 und 3**

### 2. METHODE

#### **2.1 Versuchspersonen**

#### **2.2 Aufgabe der Versuchspersonen**

#### **2.3 Versuchsplan**

#### **2.4 Versuchsdurchführung**

#### **2.5 Datenaufnahme**

#### **2.6 Ausschluß sensorischer Rückmeldung**

Visuelle Rückmeldung  
Auditive Rückmeldung  
Kutane Rückmeldung  
Vestibuläre Rückmeldung  
Propriozeptive Rückmeldung

#### **2.7 Versuchsablauf**

Aufnahmebeginn  
Bewegungsbahn  
Zielgeschwindigkeit  
Bewegungsgeschwindigkeit  
Bewegungsstrecke  
Bewegungsdauer  
Aufnahmeende  
Geschwindigkeitsbeurteilung  
Fortsetzung der Bewegungsaufnahmen  
Pausen während der Sitzungen

#### **2.8 Visuelle Rückmeldung (nur Experiment 2 und 3)**

#### **2.9 Monetäre Verstärkung: Bonus-Regelung (nur Experiment 2 und 3)**

„Einfache Bonus-Regelung“  
„Erweiterte Bonus-Regelung“ (nur Experiment 3)

## **2.10 Auswertung der Rohdaten**

- Anzahl der Bewegungsaufnahmen
- Kontrolle der Bewegungsaufnahmen
- Messung der Bewegung
- Messung der Bewegungsstrecke
- Messung der Bewegungsdauer
- Messung der Bewegungsgeschwindigkeit
- Messung der Geschwindigkeitskonstanz

## **2.11 Berechnung der Häufigkeitsverteilungen**

- Häufigkeitsverteilungen
- Median und Quartildifferenzen

## **2.12 Bestimmung von Unterschiedsschwellen (nur Experiment 2 und 3)**

- Psychometrische Funktionen
- Datenfenster der gleitenden Mediane
- Unterschiedsschwellen
- Steigung der psychometrischen Funktionen

# **3. EXPERIMENT 1**

## **3.1 Fragestellung**

## **3.2 Ergebnisse**

### **3.2.1 Bewegungsaufnahmen**

- Anteil der akzeptierten Bewegungsaufnahmen
- Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilskategorie

### **3.2.2 Häufigkeitsverteilungen**

- Häufigkeitsverteilungen und Urteilskategorien
- Mediane
- Quartildifferenzen

### **3.2.3 Geschwindigkeitsverlauf**

### **3.2.4 Befragung der Versuchspersonen**

## **3.3 Diskussion**

# **4. EXPERIMENT 2**

## **4.1 Fragestellung**

## **4.2 Ergebnisse**

### **4.2.1 Bewegungsaufnahmen**

- Anteil der ungültigen Bewegungsaufnahmen
- Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilskategorie
- Anteil richtiger Urteile

### **4.2.2 Häufigkeitsverteilungen**

- Mediane
- Quartildifferenzen

### **4.2.3 Unterschiedsschwellen**

### **4.2.4 Steigungen der psychometrischen Funktionen**

### **4.2.5 Geschwindigkeitsverlauf**

### **4.2.6 Monetäre Verstärkung: Bonusbeträge**

### **4.2.7 Befragung der Versuchspersonen**

### **4.3 Diskussion**

Veränderungen in Experiment 2  
Efferente und afferente Leistung  
Planung von Entscheidungsexperimenten

## **5. EXPERIMENT 3**

### **5.1 Fragestellung**

### **5.2 Ergebnisse**

#### **5.2.1 Bewegungsaufnahmen**

Anteil der ungültigen Bewegungsaufnahmen  
Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilkategorie  
Anteil richtiger Urteile

#### **5.2.2 Häufigkeitsverteilungen**

Mediane  
Quartildifferenzen

#### **5.2.3 Unterschiedsschwellen**

Unterschiedsschwellen und Weber-Quotienten  
Unterschiedsschwellen und Winkelgeschwindigkeit  
Unterschiedsschwellen und Anzahl der Bewegungsaufnahmen  
Unterschiedsschwellen und gleitende Mediane  
Unterschiedsschwellen und Strecke sowie Dauer

#### **5.2.4 Steigungen der psychometrischen Funktionen**

#### **5.2.5 Verlauf der Bewegungsaufnahmen**

Geschwindigkeitsverlauf  
Verlauf Strecke und Dauer

#### **5.2.6 Schwankungsbreite von Strecke und Dauer**

Mittlere Bewegungsstrecke  
Mittlere Bewegungsdauer

#### **5.2.7 Monetäre Verstärkung: Bonusbeträge**

#### **5.2.8 Befragung der Versuchspersonen**

Kinästhetische Leistung und monetäre Verstärkung  
„Doppelter Bonus“  
Beurteilung „efferente“ und „afferente“ Aufgabe  
Beurteilung der Zielgeschwindigkeiten  
Beurteilung Geschwindigkeitswahrnehmung

### **5.3 Diskussion**

## **6. FAZIT**

### **6.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse**

### **6.2 Diskussion der Ergebnisse**

„Kinästhesie“ beinhaltet „Wahrnehmung“  
„Kinästhesie“ beinhaltet „Bewegung“  
Kinästhesie „aktiver“ versus „passiver“ Bewegungen  
Kinästhetische Leistung und monetäre Verstärkung  
Kinästhesie und apparative Erfassung der Bewegungsgeschwindigkeit  
Bedeutung des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens

### **6.3 Zusammenfassung der wesentlichen Implikationen der Ergebnisse**

## **ANHANG**

### Anhang A

Experiment 1: Tab. A-01 bis A-05

### Anhang B

Experiment 1: Abb. B-01 bis B-12: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten

### Anhang C

Experiment 1: Abb. C-01 bis C-12: Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeiten

### Anhang D

Experiment 2: Tab. D-01 bis D-09

### Anhang E

Experiment 2: Abb. E-01 bis E-06: Häufigkeitsverteilungen und psychometrische Funktionen

### Anhang F

Experiment 3: Tab. F-01 bis F-16

### Anhang G

Experiment 3: Abb. G-01 bis G-12: Häufigkeitsverteilungen und psychometrische Funktionen

### Anhang H

Experiment 3: Abb. H-01 bis H-12: Bewegungsdauer in Abhängigkeit von der Bewegungsstrecke

## **LITERATURVERZEICHNIS**

## Zusammenfassung

### **Psychophysik willkürlicher Bewegungen: Kinästhesie der Geschwindigkeit**

Eine neuartige Methode zur erstmaligen Erhebung von Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit von willkürlich ausgeführten Armbewegungen

Wie gut werden Unterschiede in der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen wahrgenommen? Die Kinästhesie der Geschwindigkeit als eigenständige Sinnesleistung fand trotz sowohl diesbezüglicher neurophysiologischer Kenntnisse als auch der phänomenologischen Trennbarkeit der Wahrnehmung einer Bewegung von der Stellung der Gliedmaßen durch Reizung der Muskelspindelrezeptoren bislang keine psychophysische Beachtung. Ein Grund liegt darin, daß die Rolle sensorischer Afferenzen für die Wahrnehmung von Gliedmaßenbewegungen bis heute umstritten ist. Ein weiterer Grund ist, daß kinästhetische Schwellen nur mit willkürlichen Bewegungen sinnvoll zu bestimmen sind, da die Empfindlichkeit der verantwortlichen Muskelspindelrezeptoren über die intrafusale Muskulatur efferent gesteuert wird. Klassische psychophysische Verfahren sind folglich nicht anwendbar.

Vorgestellt wird eine in drei aufeinander aufbauenden Experimenten entwickelte Methode „aktiver Psychophysik“, mit der die Versuchspersonen (Vpn) gleichzeitig als „Stimulusgenerator“ und als „Beurteiler“ dienten und mit der erstmals kinästhetische Unterschiedsschwellen für die Geschwindigkeit von Gliedmaßenbewegungen erhoben wurden.

Aufgezeichnet wurden einfache Extensionsbewegungen des Unterarms, die rein kinästhetisch kontrolliert, d. h. ohne taktile, visuelle, auditive oder anderweitige Rückmeldung, mit einer konstanten Geschwindigkeit ausgeführt, eine vorgegebene Zielgeschwindigkeit so exakt wie möglich treffen sollten. Im Anschluß an jede Bewegung beurteilten die Vpn die soeben produzierte Geschwindigkeit im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit. In **Experiment 2 und 3** wurden nach dem Urteil die produzierte und die Zielgeschwindigkeit in Form von Steigungsgeraden auf einem Monitor dargestellt. Der visuelle Vergleich der beiden Steigungsgeraden diente als Rückmeldung über die Bewegungsgeschwindigkeit und die Richtigkeit des Urteils. Die mittlere 75 %-Unterschiedsschwelle für die 12 Vpn aus **Experiment 3** stieg linear mit der Zunahme der Zielgeschwindigkeit von 1,15 cm/s (10 cm/s), auf 1,71 cm/s (20 cm/s) und 2,36 cm/s (30 cm/s) an. Die entsprechenden Weber-Quotienten betragen 0,12, 0,09 und 0,08.

Die Ergebnisse von **Experiment 1 und 2** schienen die weit verbreitete Auffassung zu bestätigen, daß die Geschwindigkeit von Gliedmaßenbewegungen kinästhetisch nur sehr begrenzt unterscheidbar ist. Entscheidend für den Erfolg in **Experiment 3** ist ein „Bonus-System“ monetärer Verstärkung, mit dem die Vpn mit jeder Bewegung einen Geldbetrag erwirtschaften konnten und das dem Experiment den Charakter eines „Geschicklichkeitsspiels“ verlieh. Es belohnte zum einen für jede einzelne Bewegung sowohl die Annäherung an die Zielgeschwindigkeit als auch das Fällen eines richtigen Urteils. Zum anderen ging in die Belohnung die Gesamtleistung sowohl für ein ausgewogenes Verhältnis an „schneller“- zu „langsamer“-Urteilen als auch für einen Mindestanteil an richtigen Urteilen mit ein.

Nach unserer Kenntnis repräsentieren diese Daten die erste Bestimmung von Unterschiedsschwellen für die kinästhetische Wahrnehmung der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen. Zum einen wurde die Möglichkeit und Notwendigkeit der psychophysischen Untersuchung von willkürlichen Bewegungen dargestellt, zum anderen wurde der maßgebliche Einfluß der Konsequenz eines Urteils für die Vpn auf die Wahrnehmungsleistung gezeigt. Diese neuartige Methode zur Bestimmung von Unterschiedsschwellen belegt und quantifiziert erstmals die kinästhetische Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen und eröffnet neue Möglichkeiten zur Erfassung der sensomotorischen Leistungsfähigkeit, deren Kenntnis und Verständnis zum Lernen und Wiedererlernen sowohl alltäglicher als auch spezieller Bewegungsabläufe bedeutsam ist.

---

# **1. Einleitung**

## **1.1. Kinästhesie der Geschwindigkeit**

Wie gut werden Unterschiede in der Bewegungsgeschwindigkeit der eigenen Gliedmaßen wahrgenommen? Bis zum heutigen Tag ist keine Untersuchung bekannt, in der das kinästhetische Auflösungsvermögen für die Geschwindigkeit von Eigenbewegungen der Gliedmaßen bestimmt oder in der kinästhetische Unterschiedsschwellen erhoben wurden.

Auf den ersten Blick ist dies überraschend. Das kinästhetische Sinnessystem hat jedoch in der Psychologie bei weitem nicht die Aufmerksamkeit wie z. B. das visuelle Sinnessystem erlangt und ist nicht annähernd so gut untersucht. Die mangelnde Attraktivität als Forschungsgegenstand ist aber nicht begründbar. Erst mit der Fähigkeit zur Bewegung und der Umsetzung ziel- und zweckgerichteter Handlungen erlangt die Wahrnehmung der Außenwelt eine Bedeutung für den Organismus. Eine Voraussetzung zum Erlernen und erfolgreichen Ausführen dieser Bewegungen ist die Wahrnehmung der eigenen Gliedmaßenbewegungen. Die kinästhetische Wahrnehmbarkeit der eigenen Gliedmaßenbewegung und speziell deren Geschwindigkeit, wird auf psychophysischer Seite bis heute jedoch kaum beachtet, weit unterschätzt, oder in Frage gestellt. Der Begriff „Kinästhesie“ wird zudem meist wahllos als Sammelbegriff für jedwede somatosensorische Sinneswahrnehmung, wie z. B. auch für das taktile Sinnessystem eingesetzt (**s. 1.1**).

Dem gegenüber stehen zahlreiche neurophysiologische Befunde über eigenständige neuronale Kanäle der kinästhetischen Informationsverarbeitung für die unterschiedlichen Qualitäten der eigenen Gliedmaßenbewegungen, wie der kinästhetischen Wahrnehmung, daß eine Bewegung stattfindet, der Wahrnehmung der Richtung oder der Geschwindigkeit einer Bewegung (**s. 1.2**). Des weiteren wurde gezeigt, daß die kinästhetische Wahrnehmung der eigenen Gliedmaßenbewegungen und speziell deren Geschwindigkeit durch die Stimulation der Muskelspindelrezeptoren gezielt zu beeinflussen ist. Mit einer solchen Stimulation geht auch die Trennung von der Wahrnehmung der Stellung der eigenen Gliedmaßen einher (**s. 1.3**).

Für die Vernachlässigung der Untersuchung der Kinästhesie der Geschwindigkeit von Gliedmaßenbewegungen sind mehrere Gründe aufzuführen. Zum einem galt es „historische Hürden“ zu nehmen: Bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts war es strittig, ob Bewegungen der Muskeln und Gelenke überhaupt als solche wahrgenommen werden und wenn ja, welche Mechanorezeptoren dafür verantwortlich sind (**s. 1.2**). Erst Ende der 70er Jahre wurde belegt, daß die Wahrnehmung der Bewegungsgeschwindigkeit der Gliedmaßen eine eigenständige Sinnesleistung ist, die nicht auf der Wahrnehmung aufeinanderfolgender Gliedmaßenstellungen beruht (**s. 1.3**).

Zum anderen weist das kinästhetische Sinnessystem Eigenheiten auf, die die Erhebung von Unterschiedsschwellen erschweren: Die Empfindlichkeit der verantwortlichen Muskelspindelrezeptoren wird über eine eigene sogenannte intrafusale Muskulatur der Bewegungsabsicht angepaßt. Die Leistungsfähigkeit der kinästhetischen Geschwindigkeitswahrnehmung ist deshalb nur mit willkürlichen und nicht mit passiv geführten Bewegungen sinnvoll zu erfassen (**s. 1.4**).

Klassische psychophysische Verfahren sind mit willkürlichen Gliedmaßenbewegungen nicht anwendbar. Um Unterschiedsschwellen in der Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Bewegungen der eigenen Gliedmaßen zu erheben, war es daher notwendig, eine Methode zu entwickeln, in der die Versuchspersonen gleichzeitig als „Stimulusgeneratoren“ und als „Beurteiler“ dienten (**s. 1.5**).

Mit einer Auswahl von drei aufeinander aufbauenden Experimenten wird eine psychophysische Methode vorgestellt, mit der Unterschiedsschwellen in der kinäs-

thetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit von selbstinitiierten, willkürlich durchgeführten Armbewegungen (die folgend als „aktive“ Armbewegungen bezeichnet werden) ohne taktile, visuelle, vestibuläre, auditive oder anderweitige Sinnesbeteiligung erfaßt wurden.

### Kinästhesie

Das Wort „Kinästhesie“ setzt sich aus dem griechischen „kinein“ für „bewegen“ und „aisthesis“ für „Sinneswahrnehmung“ zusammen. Kinästhesie ist die Wahrnehmung von den Bewegungen der körpereigenen, mit quergestreifter Muskulatur ausgestatteten Körperteile zueinander, die von spezialisierten Mechanorezeptoren in den Muskeln und Gelenken (s. 1.2) vermittelt wird.

Die historischen Wurzeln des Begriffs liegen im 19. Jahrhundert. Die Wahrnehmung der statischen Position und Bewegung von Körperteilen aufgrund von Kontraktionen der Skelettmuskulatur sowie die Wahrnehmung isometrischer Muskelkontraktionen wurde von Sir Charles Bell als „Muskelsinn“ (1826) bzw. als „sechster Sinn“ (1833, zitiert nach McCloskey, 1978) bezeichnet. Bastian (1888) prägte den Begriff „Kinästhesie“, der die von Bell aufgeführten Wahrnehmungsfähigkeiten des „Muskelsinns“ beinhaltet und deren afferenten Ursprung er bereits in Rezeptoren der Sehnen und Muskeln vermutete.

Zu beachten ist, daß die Wahrnehmung der Stellung der Gliedmaße nicht die im Wort „Kinästhesie“ enthaltene Bedingung der Bewegung erfüllt (s. 1.3). Die Wahrnehmung einer Gliedmaßenbewegung beinhaltet wiederum unterschiedliche und voneinander unabhängige Qualitäten, wie deren Zuordnung zu einer Gliedmaße bzw. deren beweglichen Teilen, der Richtung, der Geschwindigkeit, dem Zusammenspiel der Körperteile sowie der Veränderung der Bewegung über ihren Verlauf. Ferner kann die bloße Anwesenheit einer Bewegung ohne deren Eigenschaften wahrgenommen werden (Goldscheider, 1889; Laidlaw & Hamilton, 1937; Hall & McCloskey, 1983).

Außer Gliedmaßenbewegungen werden skeleto-muskuläre Bewegungen der Wirbelsäule inkl. des Kopfes und des Kiefers sowie, ohne Beteiligung des Skeletts, Bewegungen der Augen, der Zunge oder z. B. der Bauchdecke wahrgenommen. Im folgenden werden wir uns auf die kinästhetische Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Eigenbewegungen und experimentell auf die Untersuchung von einfachen Armbewegungen des Menschen beschränken.

### Kinästhesie und Propriozeption

Neben dem Begriff „Kinästhesie“ wird auch oft der von Sherrington (1906) eingeführte Begriff „Propriozeption“ (aus dem lateinischen „Eigenwahrnehmung“) verwendet. In Abgrenzung gegenüber der Verarbeitung von außen auf den Körper einwirkenden Reizen durch „Exterozeptoren“, faßt er die (nicht notwendigerweise bewußte) Verarbeitung sämtlicher, durch die eigene Körperaktivität entstehender, Sinnesreize aufgrund der Reizung von „Interozeptoren“ und „Propriozeptoren“ zusammen. Zum propriozeptiven System zählte Sherrington neben den Muskel- und Gelenkrezeptoren auch das Vestibuläre System.

Es besteht heute keine verbindliche Regelung betreffs einer Zuordnung von Sinnesorganen und Sinnesleistungen zur „Kinästhesie“ bzw. zur „Propriozeption“. Im Extremfall werden sie entweder als synonym oder mit verschiedenen Begründungen als sich gegenseitig ausschließend betrachtet (Hopkins, 1972).

Als Propriozeptoren werden im folgenden die somatosensorischen Mechanorezeptoren bezeichnet, der periphere Umwandlungsprozeß in ein neuronales Eingangssignal

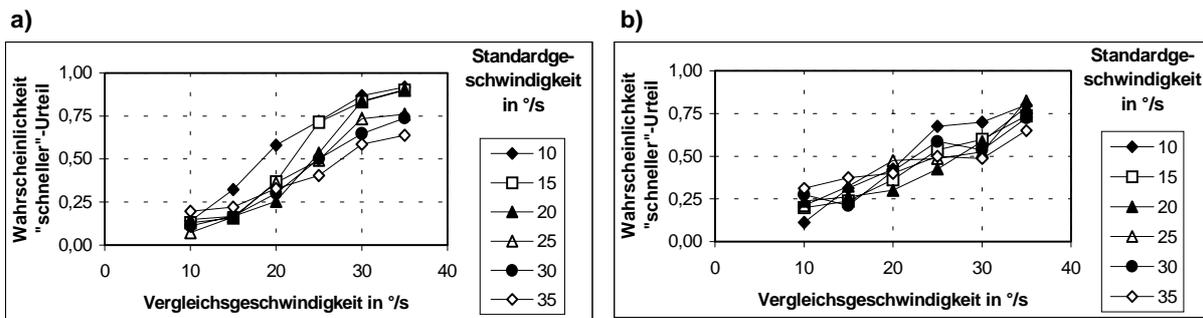
und dessen afferente Fortleitung zum Zentralnervensystem (ZNS) als Propriozeption. Kinästhesie, als zentralnervös integrierte Wahrnehmungsleistung, beruht auf den Eingangssignalen derjenigen Propriozeptoren, die die Bewegungsinformationen vermitteln.

### Untersuchungen zur Kinästhesie

Veröffentlichungen über kinästhetische Leistungen beginnen i. d. R. mit einer Definition der Kinästhesie, in der die Wahrnehmung der Bewegung hervorgehoben wird. Ein Großteil der psychophysischen Untersuchungen betrifft jedoch das taktile Auflösungsvermögen, den Stellungs- u. Lagesinn und, wenn die Bewegungswahrnehmung untersucht wird, die Erhebung von Detektionsschwellen (Goldscheider, 1889; Cleghorn & Darcus, 1952; Kokmen et al., 1977; Gandevia et al., 1983; Hall & McCloskey, 1983; Thelen et al., 1998). Wenn demonstriert wird, daß die afferente Information der Bewegungsgeschwindigkeit verarbeitet wird (Cordo et al., 1994; Milner, 1986) bleibt die wahrnehmbare Qualität der Geschwindigkeit meist unberücksichtigt.

Die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt in Modellen zur räumlich-zeitlichen Integration, wie dem Isochronie-Prinzip (Bryan, 1892; Katz, 1969), Fitts' law (Fitts, 1954) oder solchen zu Funktionen des Cerebellums und der Basalganglien eine zentrale Rolle ein. Deren Wahrnehmung ist zur Ausführung zielgerichteter ballistischer Bewegungen aufgrund der notwendigen Vorprogrammierung jedoch allenfalls zur anschließenden Erfolgskontrolle und nicht zur Ausführung der Bewegung notwendig. Geschwindigkeit wird in diesen Untersuchungen als abhängige Variable zur nachträglichen Bestimmung funktioneller Qualitäten der Bewegung (ballistisch versus rampenförmig, schnell versus langsam, Typ I versus Typ II (Freund, 1986)) herangezogen, jedoch nicht als Eingangsgröße variiert.

Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse einer psychophysischen Untersuchung von Grill et al. (1994), die explizit Bezug auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit nimmt, wird deutlich, daß die erfaßte Wahrnehmungsleistung keine der Bewegungsgeschwindigkeit ist: Grill et al. fanden u. a. für die Wahrnehmung eines abrupten Geschwindigkeitswechsels während einer passiv geführten Fingerbewegung (Geschwindigkeiten zwischen 10°/s und 35°/s in Stufen von 5°/s) eine Beeinträchtigung bei Patienten mit cerebellärer Degeneration im Vergleich zu gesunden Probanden. Gesunde Probanden erkannten überzufällig im Mittel über alle Vergleichsgeschwindigkeiten hinweg einen Geschwindigkeitsunterschied von 10°/s, cerebelläre Patienten einen Unterschied von 15°/s. Obwohl vom Datenmaterial her z. T. möglich, wurden keine Unterschiedsschwellen berechnet. Die hier nachträglich erfolgte Abbildung der angegebenen Wahrscheinlichkeitswerte als psychometrische Funktionen (Abb. 1-01) zeigt, daß die Daten nicht geeignet sind, die Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Gliedmaßenbewegungen zu beschreiben: Es findet keine Verschiebung der psychometrischen Funktionen mit zunehmender Standard- gegenüber der Vergleichsgeschwindigkeit statt, d. h. die Bewegungsgeschwindigkeit hatte keinen Einfluß auf das Geschwindigkeitsurteil, und den Wahrscheinlichkeitswerten liegt keine Geschwindigkeitsunterscheidung zugrunde. Es ist anzunehmen, daß den Geschwindigkeitsurteilen die Detektion eines Geschwindigkeitswechsels und nicht die Wahrnehmung der Geschwindigkeit zugrunde lag, die zudem durch die gleichdauernde Vorgabe von jeweils 500 ms mit einer Wahrnehmung der zurückgelegten Strecke der einzelnen Bewegungsanteile konfundiert war. Mit Vergleichsgeschwindigkeiten, die z. T. ein Vielfaches der Standardgeschwindigkeiten betragen, bleibt nichtsdestotrotz eine außerordentlich „schlechte“ Leistung sowohl für die Patienten als auch für die Gesunden festzuhalten.



**Abb. 1-01 a) – b):**

Darstellung der von Grill et al. (1994) angegebenen Daten als psychometrische Funktionen: Wahrscheinlichkeitswerte der „schneller“-Geschwindigkeitsurteile für die jeweilige Standardgeschwindigkeit, abgetragen gegen die Vergleichsgeschwindigkeit (je 10%/s bis 35%/s in Schritten von 5%/s). Abb. 1-01 a) Mittelwerte der gesunden Probanden (N=18); Abb. 1-01 b) Mittelwerte der Patienten mit cerebellärer Degeneration (N=8).

## 1.2 Neuronale Grundlagen

### Kinästhesie und somatosensorische Mechanorezeptoren

Afferente Informationen über die Bewegung und die Stellung der Gliedmaßen werden von den in der Muskulatur eingebetteten Muskelspindel- und Sehnenrezeptoren sowie von Gelenkrezeptoren vermittelt. Die Geschwindigkeitsinformation stammt von den primären Muskelspindelrezeptoren.

Bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts war aufgrund zahlreicher widersprüchlicher Befunde die Rolle der Mechanorezeptoren für die Wahrnehmung der Bewegung und Stellung der Gliedmaßen umstritten (einen historischen Überblick bieten McCloskey, 1978; Goodwin et al., 1972b; Clark & Horch, 1986). Sherrington (1900) verfocht bereits die Auffassung, daß Rezeptoren in den Muskeln und Gelenken für die Wahrnehmung der Gliedmaßenbewegungen verantwortlich sind. Gestützt durch zahlreiche experimentelle Befunde setzte sich in den 50er Jahren jedoch die Auffassung durch, daß Muskelbewegungen an sich nicht wahrnehmbar seien. Neben der Idee bzw. Theorie eines „Innervationssinnes“ (Helmholtz, 1925), die besagt, daß allein der „efferente Bewegungsbefehl“ unabhängig von dem Erfolg der Ausführung wahrnehmbar sei, galten insbesondere aufgrund der einflußreichen Veröffentlichungen von Skoglund (1956, 1973) die Gelenkrezeptoren als Favoriten für die Übermittlung der Stellungs- und Bewegungsinformation der Gliedmaßen. In der Weiterentwicklung des Konzepts eines Innervationssinnes von Helmholtz (Sperry, 1950; von Holst, 1954) wurde die Aufgabe der Muskelspindeln in dem nicht bewußt stattfindenden Abgleich zwischen der Differenz der angestrebten und der ausgeführten Muskellänge gesehen (Merton, 1964). Erst seit Ende der 60er Jahre wurden mit verbesserten Untersuchungstechniken in Replikationen der bisher eindeutig gegen eine Beteiligung der Muskelspindelrezeptoren an der Wahrnehmung sprechenden Experimente nachgewiesen, daß diese tatsächlich die Informationsquelle für die Wahrnehmung der Gliedmaßenstellung und der Gliedmaßenbewegung sind. Die kinästhetische Bedeutung eines „corollary discharge“ wird zunehmend in Frage gestellt, da nach Betäubung der Muskelrezeptoren eine willkürliche Bewegung nicht mehr wahrzunehmen ist, auch wenn die Bewegung aufgrund der Muskelaktivität noch stattfindet (z. B. Laszlo, 1966; Goodwin et al., 1972a), nach Curarisierung (d. h. nach Lähmung der Muskulatur durch das Muskelrelaxans Curare, ohne daß deren Sensibilität beeinträchtigt ist) wahrgenommen wird, daß die Gliedmaßen nicht willkürlich bewegt werden können (Campbell, 1970), oder Bewegungswahrnehmung einer Phantomgliedmaße nach Gliedmaßenamputation nur möglich ist, wenn im Gliedmaßenstumpf noch muskelspindelhaltige Muskelanteile vorhanden sind (Riddoch, 1941; Henderson & Smyth, 1948).

### Muskelspindeln

Unterschieden werden primäre und sekundäre Muskelspindelrezeptoren. Diese strikte Einteilung aufgrund der Leitungsgeschwindigkeit wird zwar kritisch diskutiert (Wei et al., 1986) und die genaue Funktionsweise der Rezeptoren bleibt im Detail umstritten (Houk et al., 1981), die Aufgabe der primären Muskelspindeln wird jedoch in der Übermittlung der Geschwindigkeit der Muskeldehnung und die der sekundären in der Übermittlung der Muskellänge gesehen (McCloskey, 1978; Burgess et al., 1982; Roll & Vedel, 1982; Clark & Horch, 1986, 1987).

Ein geringfügiger Zug an einer operativ offen gelegten Sehne und die damit verbundene Stimulation der Muskelspindeln durch eine Veränderung der Muskellänge (Matthews & Simmonds, 1974; McCloskey et al., 1983) sowie Vibrationsreize, die, an den Muskelsehnen angelegt, selektiv die primären Muskelspindelrezeptoren stimulieren (Goodwin et al., 1972b), führen - ohne daß eine Bewegung der Gliedmaße stattfindet - zu einer illusorischen Bewegungswahrnehmung der betroffenen Gliedmaße.

### Golgi-Sehnenrezeptoren

Neben den Muskelspindelrezeptoren sind Golgi-Sehnenrezeptoren in die Muskulatur eingebettet, die bei Muskelanspannung auf den intramuskulären Druck reagieren (Crago et al., 1982) und die Wahrnehmung der Muskelspannung der an der isotonischen und isometrischen Kraftentwicklung beteiligten Muskeln ermöglichen (Clark & Horch, 1986). Den Sehnenrezeptoren kommt keine direkte Bedeutung für die Bewegungswahrnehmung zu, eine Unterstützung wird jedoch nicht ausgeschlossen.

### Gelenkrezeptoren

Des weiteren überwachen im skeleto-muskulären Bewegungsapparat mehrere Arten von Gelenkrezeptoren die Bewegungsabläufe. Langsam adaptierende Ruffini-Rezeptoren reagieren auf Streckung, Golgi-Mazzoni-Rezeptoren auf Druck und freie Nervenendigungen auf Schmerz (Grigg und Hoffmann 1982; Grigg et al., 1982). Schnell adaptierende, sog. paciniförmige Rezeptoren scheinen das Auftreten einer Bewegung zu signalisieren, ohne diese zu spezifizieren (McCloskey, 1978).

Heute gilt es als gesichert, daß die Gelenkrezeptoren vorwiegend an den Anschlagwinkeln der Gelenke feuern und dem Schutz vor Überdehnung dienen. Ein stabilisierender Beitrag der Gelenkrezeptoren zur kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit wird zwar nicht ausgeschlossen (McCall et al., 1974; Burgess et al., 1982), der geringfügigen kinästhetischen Funktion wird aber nur für den Fall eine Bedeutung zugemessen, in dem keine Informationen der Muskelspindelrezeptoren zur Verfügung stehen (Burke et al., 1988).

### Aufsteigende Bahnen

Die Afferenzen der Muskel- und Gelenkrezeptoren ziehen in der dorsalen Säule des Rückenmarks über den Nucleus cuneatus im medialen lemniscalen System aufsteigend über das ventroposteriore Kerngebiet des Thalamus (Kaas & Pons, 1988) vorwiegend zum somatosensorischen Kortex. Ebenso wurden ipsilateral verlaufende Bahnen nachgewiesen.

Auf Gliedmaßenbewegung ansprechende Neuronen, deren Aktivität an somatosensorische Eingänge der Muskel- und Gelenkrezeptoren gebunden ist, wurden während stereotaktischer Eingriffe am Menschen im ventralen Kerngebiet des Thalamus nachgewiesen. Ohye et al. (1989) leiteten im nucleus ventralis intermedius (Vim) Aktivität von kinästhetischen Neuronen ab, die auf kontralaterale Gliedmaßenbewegungen ansprachen. Diese waren räumlich von den Neuronen getrennt, die auf tak-

tile Reizung hin feuerten. Lenz et al. (1990, 1994) wiesen thalamische Neuronen nach, die auf Stimulation der Muskelrezeptoren hin feuerten.

### Kortikale Verarbeitung

Oscarsson & Rosén (1963) wiesen an der Katze erstmals kortikale Projektionen der Muskelspindelafferenzen nach. Die Hauptprojektionen der Muskel- und Gelenkrezeptoren führen beim Affen über den Thalamus (Wiesendanger & Miles, 1982; Jones & Friedman, 1982) in den primären sensomotorischen Kortex. Afferenzen der primären Muskelspindelrezeptoren projizieren vorwiegend auf geschwindigkeitssensitive Neuronen in Area 3a, die der sekundären Muskelspindeln jedoch vorwiegend auf positionssensitive Neuronen in Area 4 (Phillips et al., 1971, Lucier et al., 1975; Hore et al., 1976). Landgren et al. (1967) zeigten Projektionen zum sekundären sensomotorischen Kortex auf, erstmals Woolsey et al. (1947) und in Folge u. a. Albe-Fessard & Liebeskind (1966) direkte somatosensorische Verbindungen zum Motorkortex. Schwartz et al. (1973) evozierten durch elektrische Reizung von Muskelspindelafferenzen der Gruppe I Potentiale in Area 2 und Area 3a des primär sensomotorischen Kortex.

Insbesondere wurden in Area 5 des sekundären sensomotorischen Kortex Neuronen nachgewiesen, deren Feuerungsrate von der Geschwindigkeit der Gliedmaßenbewegungen bzw. der mit dem Elektromyogramm erfaßten Muskelaktivität abhängig ist (Chapman et al., 1984). Gardner & Costanzo (1981) fanden in Einzelzelleitungen an wachen Affen im primär somatosensorischen Kortex SI (Area 3,1,2) sowie im posterioren parietalen Kortex (Area 5) einen großen Anteil an Neuronen, die entweder

- a) nur auf Gliedmaßenbewegung feuerten und deren bewegungsrichtungsabhängige Feuerungsrate phasisch und schnelladaptierend von der Geschwindigkeit (22.5°/s bis 450°/s) einer Gliedmaßenbewegung abhing („kinesthetic neurons“, 44 %), oder
- b) deren Feuerungsrate tonisch reagierend nur von der Extensions- bzw. Flexionsstellung der Gliedmaße („postural neurons“, 13 %) abhing. Eine dritte Klasse von
- c) langsam adaptierenden Neuronen (43 %), die bereits von Mountcastle & Powell (1959) am anästhetisierten Affen beschrieben wurden, reagierte vorwiegend auf die Geschwindigkeit einer Gliedmaßenbewegung und in nur eingeschränktem Umfang auf die Stellung der Hand.

Neben Projektionen in den sensomotorischen Kortex und den angrenzenden primär-motorischen Kortex (Fetz et al., 1980) gibt es auch geschwindigkeitssensitive Neuronen im prämotorischen Kortex (Bauswein et al., 1991). Während somatosensorische Eingänge in den prämotorischen Kortex bekannt sind, die als Hinweisreiz für die Auswahl gelernter Bewegungen gelten (Passingham, 1988), sehen Bauswein et al. die Bedeutung der somatosensorischen Afferenzen darin, Störungen im beabsichtigten Verlauf einer Bewegung unter bewußter Kontrolle möglichst schnell korrigieren zu können.

Auch durch transkranielle Magnetstimulation des motorischen Kortex (Amassian et al., 1989; Pascual-Leone et al., 1994) werden Bewegungswahrnehmungen paralyzierter Gliedmaßen hervorgerufen. Lüscher et al. (1996) demonstrierten diesen Effekt mit kontralateraler Stimulation des frontalen und des parietalen Kortex und interpretierten dies als Beleg für einen „corollary discharge“. Diese Schlußfolgerung ist nicht zwingend, da, wie oben angeführt, nicht nur Neuronen im parietalen, sondern auch im motorischen und prämotorischen Kortex afferente Eingänge von den Muskelspindelrezeptoren besitzen und anzunehmen ist, daß diese mitstimuliert wurden.

### **1.3 Kinästhesie versus Stellungssinn**

Der Begriff „Kinästhesie“ wird i. d. R. für die Wahrnehmung sowohl der Bewegung als auch der Stellung der Gliedmaßen benutzt. Im folgenden wird Kinästhesie im wörtlichen Sinne auf die Wahrnehmung der Bewegung eingegrenzt, da die Wahrnehmung der Stellung und die Wahrnehmung der Bewegung von Gliedmaßen zwei eigenständige Sinnesleistungen darstellen.

Bereits auf Rezeptorebene existieren mit den primären und sekundären Muskelspindelrezeptoren voneinander unabhängige neuronale Kanäle für die Positions- u. Geschwindigkeitswahrnehmung (McCloskey, 1973). Auf kortikaler Ebene wurde in Einzelzellableitungen ebenfalls die getrennte Verarbeitung der Bewegungs- und Positionsinformation gezeigt (Gardner & Costanzo, 1981; Hore et al., 1976; Lucier et al., 1975). Beim Menschen werden kortikale somatosensorische Potentiale abgeleitet, die sich mit der Geschwindigkeit und nicht mit der Strecke einer Bewegung (Mima et al., 1996), bzw. einer Muskellängenänderung (Starr et al., 1981; Cohen et al., 1985; Abbruzzese et al., 1985) verändern.

Eine Gliedmaßenbewegung ist zwar mit einer Veränderung der Gliedmaßenstellung verbunden, durch die selektive Reizung der primären und sekundären Muskelspindelrezeptoren durch adäquate Vibrationsreize (Roll & Vedel, 1982) ist die wahrgenommene Stellung und Geschwindigkeit jedoch dissoziiert voneinander zu beeinflussen (Goodwin et al., 1972b; McCloskey, 1973; Goodwin, 1976; Sittig et al., 1985, 1987). Die Wahrnehmung der Gliedmaßenstellung u. Bewegung kann bei entsprechender Stimulation sowohl außerhalb des möglichen Gelenkradius liegen (Craske, 1977; Sittig et al., 1985) und paradox in einer Stellung verbleibend gleichzeitig als bewegt wahrgenommen werden (Goodwin et al., 1972b; Sittig et al., 1985). Die Bewegungswahrnehmung hält, losgelöst von einer Positionswahrnehmung, während der Dauer der Vibrationsreizung unbegrenzt an (Goodwin et al., 1972b; Lackner, 1975).

Die Wahrnehmung der Geschwindigkeit ist folglich nicht durch eine einfache Beziehung zwischen der Wahrnehmung der zurückgelegten Strecke und der Wahrnehmung der Dauer einer Bewegung zu erklären. Die Wahrnehmung der statischen Stellung der Gliedmaße ist kein Sonderfall der „Nicht-Bewegung“ in der Bewegungswahrnehmung.

### **1.4 Kinästhesie aktiver Bewegungen**

Die für die Übermittlung der Dehnungsinformation der Muskeln verantwortlichen Muskelspindelrezeptoren sind in einer eigenen sogenannten intrafusalen Muskelstruktur eingebettet. Die Innervation der intrafusalen Muskulatur über die  $\gamma$ -Motoneurone führt zu einer Längen- und damit Empfindlichkeitsänderung der Rezeptoren. Neben den Signalen aus dem Zentralnervensystem (ZNS) an die extrafusale Muskulatur zur Bewegungsausführung ( $\alpha$ -Innervation) wird mit den separaten Signalen an die intrafusale Muskulatur ( $\gamma$ -Innervation) efferent aus dem ZNS absteigend das afferente Antwortverhalten der Muskelspindeln auf Gliedmaßenbewegungen hin gesteuert ( $\alpha$ - $\gamma$ -Koppelung).

Das Antwortverhalten der Muskelspindeln ist also nicht nur von der  $\alpha$ -Innervation der extrafusalen Muskulatur abhängig, sondern auch von der intrafusalen  $\gamma$ -Innervation und damit im weitesten Sinne von der Bewegungsabsicht. Die Wahrnehmung von Eigenbewegungen ist somit nicht rein reaktiv von der physikalisch stattfindenden Be-

wegung abhängig: Passiv geführte Bewegungen stellen folglich keinen adäquaten Reiz für die kinästhetische Geschwindigkeitswahrnehmung dar.

Die psychophysische Untersuchung von passiv geführten Bewegungen führt aufgrund der  $\alpha$ - $\gamma$ -Koppelung zwischen der extra- und intrafusalen Muskulatur zwangsläufig zu uneindeutigen Signalen und einem immensen Anstieg in der intra- und interindividuellen Streubreite der psychophysischen Meßdaten, da die Empfindlichkeit der Muskelspindelrezeptoren nicht angemessen kontrolliert werden kann. Die Entdeckung der motorischen Funktion der  $\gamma$ -Fasern durch Leksell (1945) wurde deshalb anfänglich u. a. von Merton (1964) als weiterer Beleg gegen die Rolle der Muskelspindelrezeptoren für die bewußte Wahrnehmung herangezogen, da die Informationen aus den Muskelspindeln die physikalische Bewegung nicht eindeutig abbilden konnten, sondern im Gegenteil verwirrend sein mußten.

Die erheblichen Unterschiede in den psychophysischen Resultaten verschiedenster Untersuchungen mit passiven Bewegungen wurden immer wieder diskutiert (s. Goodwin, 1976; Clark & Horch, 1986) und sind auf den Ausgangszustand der Muskelspannung zurückzuführen (Wise et al., 1996). Cleghorn & Darcus (1952) führen im Vergleich unterschiedlicher Untersuchungen Detektionsschwellen passiver Bewegungen des Ellbogens zwischen  $0,2^\circ$  und  $2,8^\circ$  Bewegungsamplitude an, auch innerhalb der einzelnen Untersuchungen traten große interindividuelle Unterschiede auf. Browne et al. (1954) fanden nach Betäubung der Gelenk- und Hautafferenzen des Fußes erhebliche Unterschiede in den Detektionsschwellen passiver Bewegungen des großen Zehs ihrer Versuchspersonen, von denen einige die Bewegung gar nicht bemerkten, außer sie wurden aufgefordert, die Muskeln des Zehs anzuspannen. Hall & McCloskey (1983) wiesen für passive Bewegungen zehnfach erhöhte Detektionsschwellen im Ellbogengelenk bei entspannten gegenüber angespannten Armmuskeln nach. Neurographische Ableitungen von Ia Muskelspindel-Afferenzen zeigen beim Menschen während aktiver Bewegungen eine höhere Feuerungsrate gegenüber dem Ruhezustand (Vallbo, 1974; Al-Falahe et al., 1990).

Auch in Untersuchungen zum Stellungssinn wurde gezeigt, daß aktive gegenüber passiven Bewegungen eine Verbesserung der Wahrnehmung der Position mit sich bringen (Paillard & Brouchon, 1968) und die Anspannung der Muskeln zu einer Leistungsverbesserung in der Positionierungsgenauigkeit führt (Goodwin et al., 1972a). Auch die Aktivität der Gelenkrezeptoren ist von der Muskelspannung abhängig (Edin, 1990). Sie zeigen bei passiver Bewegung der Gliedmaßen mit entspannter Armmuskulatur keine Aktivität (Al-Falahe et al., 1990).

Aus Einzelzelleableitungen sind quantitative und qualitative Unterschiede in der neuronalen Antwort auf passiv geführte versus aktiv ausgeführte (willkürlich, selbstinitiierte) Bewegungen seit langem bekannt: Aktive Bewegungen führen zu einer höheren und schwelenniedrigeren Feuerungsrate. Jasper & Bertrand (1966) beschrieben erstmals die Aktivität thalamischer Neuronen bei aktiven, willkürlichen Bewegungen. Lenz et al. (1994) wiesen während stereotaktischer Eingriffe am Menschen in der ventralen Kerngruppe des Thalamus Neuronen nach, die entweder auf aktive, willkürliche Bewegungen („voluntary cells“), oder auf somatosensorische Reizung („sensory cells“) hin reagieren, sowie Neuronen, die beide Eigenschaften besitzen („combined cells“). Mountcastle et al. (1975) fanden, daß Neuronen in Area 5 des parietalen Kortex des Affen bei aktiven gegenüber vergleichbaren passiven Bewegungen intensiver feuern und der Bewegung vorausgehen. Soso & Fetz (1980) leiteten am wachen Affen bei aktiven gegenüber vergleichbaren passiven Ellbogenbewegungen im postzentralen Kortex höhere Aktivitäten sowie unterschiedliche Aktivitätsmuster einzelner Neuronen ab.

Darüber hinaus gibt es in verschiedenen Hirnarealen Neuronen, die entweder nur auf passive oder nur auf aktive Bewegungen feuern. Den wenigen geschwindigkeitssensitiven „passiven“ Neuronen wird die Funktion eines „Notschalters“ für den Fall zugewiesen, daß durch einen äußeren Umwelteinfluß eine unerwartete passive Bewegung erfolgt, auf die nicht schnell genug reagiert werden kann (Fetz et al., 1980).

Iwamura & Tanaka (1996) fanden am wachen Affen in Area 2 des Gyrus postcentralis und darüber caudal hinausgehend Neuronen, die nur auf spezifische zielgerichtete, selbstinitiierte Finger-, Hand- u. Armbewegungen, jedoch nicht auf entsprechende passive Bewegung reagierten. Da die Neuronen frühestens mit Beginn der Bewegung feuerten, gehen Iwamura & Tanaka davon aus, daß die Aktivität durch sensorische periphere Rückmeldung und nicht durch motorische Aktivität ausgelöst wurde. Weiller et al. (1996) zeigten in einem Vergleich aktiver gegenüber passiver Unterarmbewegungen in einer PET-Studie, daß die Basalganglien und der Gyrus cinguli nur bei aktiven Armbewegungen reagierten, die Aktivierung vorwiegend im inferioren supplementärmotorischen Areal stärker war und während aktiver Bewegungen im inferioren parietalen Kortex, während passiver Bewegungen in der Tiefe des sulcus centralis nachzuweisen war. Reddy et al. (2001) zeigten in einer fMRI-Studie, daß trotz hoher Variabilität die Aktivität im kontralateralen primären Motorkortex beim gesunden Menschen für aktive Zeigefingerbewegungen höher als für passive war. Bei Patienten mit ausgeprägter distaler sensorischer Neuropathie war hingegen keine Aktivierung für passive Bewegungen nachweisbar. Reddy et al. schlußfolgern, daß die Aktivierung bei passiven Bewegungen alleine auf der sensorischen Rückmeldung beruht und nicht mit der Aktivierung durch eine mögliche Imagination der Bewegungen vermischt ist. Patienten mit ausgeprägten rein motorischen Neuropathien zeigten hingegen eine Aktivierung sowohl für aktive als auch passive Bewegungen, die über die der Gesunden hinausging.

### **1.5 Psychophysik willkürlicher Bewegungen: Experimente 1, 2 und 3**

In den vorangehenden Ausführungen wurde die Auffassung begründet, daß die kinästhetische Geschwindigkeitswahrnehmung eine eigenständige Sinnesleistung darstellt (s. 1.3), deren „wahres“ Leistungsvermögen nur mit willkürlichen, „aktiven“ Bewegungen zu bestimmen ist (s. 1.4). Die besondere Situation einer eigenen muskulären Versorgung der für den Geschwindigkeitssinn verantwortlichen Rezeptoren begründet die Notwendigkeit der Untersuchung willkürlicher, aktiver Bewegungen (s. 1.4). Kinästhetische Unterschiedsschwellen der Bewegungsgeschwindigkeit sind nach unserer Kenntnis weder für passive noch für aktive Bewegungen bekannt.

Es gilt, die Lücke zwischen der neurophysiologischen Kenntnis sowohl eines neuronalen Kanals für die kinästhetische Geschwindigkeitsinformation, gestützt durch die phänomenologische Trennbarkeit der Wahrnehmung einer Bewegung von der Stellung der Gliedmaßen durch Stimulation der Muskelspindeln (s. 1.3), als auch von geschwindigkeitssensitiven „aktiven“ und „passiven“ Neuronen (s. 1.4) und den fehlenden psychophysischen Befunden zu schließen.

Wie sind nun mit aktiv ausgeführten statt passiv geführten Gliedmaßenbewegungen Unterschiedsschwellen der kinästhetischen Geschwindigkeitswahrnehmung zu erfassen? Bei passiver Führung können mit der Methode konstanter Reize definierte Geschwindigkeiten randomisiert vorgeben und mittels einer „forced-choice“-Prozedur psychometrische Funktionen bestimmt werden. Für aktive Bewegungen sind klassische Methoden der Psychophysik nicht anwendbar: Man ist auf die Geschwindigkeitsproduktion der Versuchsperson angewiesen, die efferente und afferente

Leistung ist miteinander vermengt. Die Geschwindigkeit kann nicht experimentell vorgegeben und zufällig variiert werden, ferner kann keine Gleichverteilung der Anzahl der Bewegungen pro Geschwindigkeitsstufe experimentell festgelegt werden.

Darüber hinaus ist die Bewegungsgeschwindigkeit nicht mehr eindeutig definiert. Mit technischen Hilfsmitteln kann die Geschwindigkeit passiv geführter Bewegungen weitgehend konstant gehalten werden. Mittlere und höchste Geschwindigkeit, Anfangs- und Endgeschwindigkeit sowie jeder Ausschnitt des Bewegungsverlaufs sind in diesem Fall identisch. Eine willkürliche Bewegung weist demgegenüber nicht nur eine anfängliche Beschleunigungs- und eine beendende Abbremsphase, sondern im natürlichen physiologischen Bewegungsverlauf auftretende Schwankungen der Geschwindigkeit auf.

Mit der Durchführung von aktiven Bewegungen war, um zu Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der eigenen Gliedmaßenbewegungen zu gelangen, also eine psychophysische Methode zu entwickeln, in der die Versuchspersonen gleichzeitig als „Stimulusgenerator“ und „Beurteiler“ dienten und mit der die Bewegungsgeschwindigkeit hinreichend genau erfaßt werden konnte.

Vorgestellt wird im folgenden eine solche in drei aufeinander aufbauenden Experimenten entwickelte Methode „aktiver Psychophysik“, mit der erstmals Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit von selbstinitiierten, willkürlich ausgeführten Armbewegungen ohne taktile, visuelle, vestibuläre oder auditive Beteiligung erfaßt wurden.

In **Experiment 3** wurden durch eine Änderung am Bonus-System, das neben der Leistung für die einzelne Bewegung nun auch die Gesamtleistung aller Bewegungen berücksichtigte, erstmalig erfolgreich Unterschiedsschwellen für die kinästhetische Geschwindigkeitswahrnehmung von aktiven Armbewegungen erhoben.

Entscheidend für den Erfolg war ein in **Experiment 2 und 3** eingeführtes „Bonus-System“ monetärer Verstärkung, mit dem die Versuchspersonen mit jeder Bewegung einen Geldbetrag erwirtschaften konnten und das dem Experiment den Charakter eines „Geschicklichkeitsspiels“ verlieh.

**Experiment 1** diente dazu, eine erste Abschätzung über das Leistungsvermögen zu erhalten, die Geschwindigkeit einer Armbewegung möglichst gleichschnell zu wiederholen und hinsichtlich des Erfolgs entweder als „gleichschnell“ oder als „schneller“ bzw. „langsamer“ zu beurteilen.

In **Experiment 2** wurde, um zu einer psychometrischen Funktion der Unterschiedsschwellen zu gelangen

- a) eine „forced-choice“-Urteilsabgabe („schneller“ oder „langsamer“ als die Zielgeschwindigkeit) eingeführt,
- b) eine visuelle Rückmeldung über den Erfolg der Geschwindigkeitsreproduktion und das Urteil und
- c) ein System monetärer Verstärkung („Bonus-System“), mit dem die Versuchspersonen für die Güte sowohl der Geschwindigkeitsreproduktion als auch der Geschwindigkeitsurteile jeder Bewegung belohnt wurden.

Einerseits war für die Versuchspersonen mit der produzierten Bewegungsgeschwindigkeit und ihrer anschließenden Beurteilung der Geschwindigkeit eine Handlungskonsequenz verbunden (positive / negative Verstärkung), andererseits war es mit der monetären Verstärkung möglich, das Verhalten der Versuchspersonen in einer Art „shaping-Prozedur“ so zu beeinflussen, daß für die Erhebung von Unterschiedsschwellen sowohl eine genügende Anzahl an richtigen Urteilen als auch eine vergleichbare Anzahl an „langsamer“- und „schneller“-Urteilen in dem produzierten Geschwindigkeitsspektrum zur Verfügung stand.

Während die Ergebnisse von **Experiment 1 und 2** auf den ersten Blick für die auch heute noch vielfach vertretene Meinung sprechen, daß motorische Leistungen der kinästhetischen Wahrnehmung nicht oder nur eingeschränkt zugänglich sind (Fourneret & Jeannerod, 1998), wird entgegen dieser Auffassung mit **Experiment 3** eindrücklich gezeigt, daß durch geeignete Maßnahmen die kinästhetische Wahrnehmungsleistung erheblich zu steigern ist.

Das folgende **Kapitel 2** ist als allgemeiner Methodenteil verfaßt, in dem die Details des Versuchsaufbaus, der Durchführung und Auswertung der drei Experimente beschrieben werden. In **Kapitel 3, 4 und 5** werden die drei aufeinander aufbauenden Experimente einzeln besprochen. In **Kapitel 6** wird aus den Ergebnissen ein Fazit gezogen.

## **2. Methode**

## 2.1 Versuchspersonen

An den drei Experimenten nahmen je zwölf (**Experiment 1 und 3**) bzw. sechs (**Experiment 2**) gesunde, rechtshändige Versuchspersonen (Vpn) teil. Die Altersspanne lag zwischen 18 und 38 Jahren (**Experiment 1**: zwischen 20 u. 35 Jahren, Median 22,5 Jahre; **Experiment 2**: zwischen 25 und 36 Jahren, Median 26,0 Jahre; **Experiment 3**: zwischen 18 und 38 Jahren, Median 24,5 Jahre). In jedem Experiment war die Hälfte der Vpn weiblich bzw. männlich. Jede Vp nahm einzeln und jeweils nur an einem der Experimente teil.

In **Experiment 1** erhielten die Vpn für ihre Teilnahme ein festgelegtes Entgelt. In **Experiment 2 und 3** erhielten die Vpn einen Geldbetrag, dessen Höhe sich nach der individuellen Leistung richtete und mittels eines „Bonus-Systems“ berechnet wurde (s. 2.9).

## 2.2 Aufgabe der Versuchspersonen

Die Vpn wurden auf die wiederholte Ausführung einer zweidimensionalen Unterarmbewegung mit einer bestimmten Zielgeschwindigkeit trainiert. Die sensorische Rückmeldung der Bewegung war auf die der Muskel- und Gelenkrezeptoren des Armes beschränkt.

Aufgabe war es, mit der Geschwindigkeit der Armbewegung die jeweilige Zielgeschwindigkeit möglichst genau zu treffen und die produzierte Geschwindigkeit anschließend im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit richtig zu beurteilen („gleichschnell“, „schneller“ oder „langsamer“ in **Experiment 1**, bzw. „schneller“ oder „langsamer“ in **Experiment 2 und 3**).

## 2.3 Versuchsplan

Die Zielgeschwindigkeiten betragen 10, 20 und 40 cm/s (**Experiment 1**), bzw. 10, 20 und 30 cm/s (**Experiment 2 und 3**).

Jedes Experiment bestand aus drei Sitzungen, die an drei verschiedenen Tagen in einem Zeitraum von zwei Wochen je Vp abgehalten wurden.

In jeder Sitzung wurde jeweils eine der drei Geschwindigkeiten als Zielgeschwindigkeit vorgegeben. Die Abfolge der Zielgeschwindigkeiten war unter den Vpn vollständig ausbalanciert.

In **Experiment 1** wurden mindestens 120, in **Experiment 2** mindestens 250 und in **Experiment 3** mindestens 500 Bewegungsaufnahmen für jede der drei Zielgeschwindigkeiten pro Vp durchgeführt.

Zu Beginn jeder Sitzung von **Experiment 2 und 3** wurden zur Einübung 30 zusätzliche Bewegungsaufnahmen zur jeweiligen Zielgeschwindigkeit unter experimentellen Bedingungen durchgeführt.

Vor jedem der drei Experimente wurde mit den einzelnen Vpn zusätzlich eine ca. halbstündige Einübungssitzung abgehalten, in der der gesamte Versuchsablauf mit allen drei Zielgeschwindigkeiten eintrainiert wurde. Zum Abschluß der Einübungssitzung mußten mindestens 30 aufeinanderfolgend akzeptierte Bewegungsaufnahmen für jede Zielgeschwindigkeit vorliegen (zu den Akzeptanzkriterien, s. 2.10: Messung der Geschwindigkeitskonstanz).

In Tab. 2-01 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Experimenten skizziert.

**Tab. 2-01:**  
**Unterschiede zwischen den drei Experimenten.**

	Anzahl Bewegungs- aufnahmen pro Zielgeschwindigkeit	ausgewertete Aufnahmen pro Zielge- schwindigkeit	Kontrolle der Ge- schwindig- keits- konstanz	Ziel- geschwin- digkeiten ( cm/s)	Ge- schwin- digkeits- urteile	Visuelle Rück- meldung	Einfaches Bonus- system	Erweiter- tes Bonus- system
<b>Exp.1</b>	120	max. 90	offline	10/20/40	- / = / +	Nein	Nein	Nein
<b>Exp.2</b>	250	240	online	10/20/30	- / +	Ja	Ja	Nein
<b>Exp.3</b>	min. 500	475	online	10/20/30	- / +	Ja	Ja	Ja

## 2.4 Versuchsdurchführung

Die Experimente wurden im Zeitraum von 1995 bis 1997 an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf in einem Labor des Instituts für „Physiologische Psychologie II“ unter Leitung von Herrn Prof. Dr. E.R. Wist durchgeführt.

Die Versuchsdurchführung pro Sitzung dauerte in **Experiment 1** ca. 30 Minuten, in **Experiment 2 und 3** zwischen 45 und 90 Minuten. Für die Einübungssitzung wurden ca. 30 Minuten benötigt.

## 2.5 Datenaufnahme

Die zweidimensionalen Armbewegungen wurden mit einem Digitalisiertablett aufgezeichnet. Die Aufnahme­fläche war 32 cm breit und 21 cm tief. Die Aufnahme­frequenz betrug 100 Hz, das räumliche Auflösungsvermögen 0,1 mm. Als Aufnahme­element diente ein flach über das Digitalisiertablett zu führender Aufnehmer mit einem Gewicht von 45 g (7,5 cm lang, 5 cm breit und 0,5 cm hoch). Die Vorderkante des Aufnehmers war kreisförmig abgerundet, so daß er bequem mit Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen gegriffen werden konnte.

Die Vp saß auf einem individuell positionierten und in der Höhe auf die Körpergröße eingestellten Hocker mit nicht-drehbarer Sitzfläche an einem Tisch. Das Digitalisiertablett war rechts vom Sitzplatz versetzt in die Tischplatte eingelassen, so daß sich die Aufnahme­fläche des Digitalisiertabletts unter der rechten Hand befand.

Die Daten wurden über einen Atari-Rechner mit einem am Institut für Physiologische Psychologie II der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf für diese Experimente entwickelten Programm zur Versuchssteuerung erfaßt und analysiert. Die Bearbeitung der Rohdaten erfolgte an dem Atari-Rechner, die graphische und statistische Auswertung erfolgte an einem IBM-kompatiblen PC.

## 2.6 Ausschluß sensorischer Rückmeldung

Mit Ausnahme der propriozeptiven Rückmeldung der Muskel- und Gelenkrezeptoren des Armes wurde die sensorische Rückmeldung über die Armbewegung unterbunden:

### Visuelle Rückmeldung

Die Vp trug eine, das gesamte Gesichtsfeld abdeckende, lichtundurchlässige Brille (**Experiment 1**) bzw. eine das gesamte Gesichtsfeld abdeckende Brille, in die eine großflächige Leuchtkristallblende (LC-Blende) eingelassen war (**Experiment 2**)

**und 3)**, die während der Bewegungsausführung in einen undurchsichtigen Zustand versetzt wurde.

#### Auditive Rückmeldung

Die Vp trug einen schallisolierenden Kopfhörer. Eventuelle leise Schleifgeräusche des Aufnehmers über die Aufnahme­fläche oder andere Begleitgeräusche waren nicht wahrnehmbar.

#### Kutane Rückmeldung

Der Aufnehmer war bodenseitig von einer ca. 1 mm dicken und 2 cm breiten Finger­auflage umrandet, so daß kein Hautkontakt zur Aufnahme­fläche gegeben war.

Der Aufnehmer lag der Aufnahme­fläche nicht direkt auf, sondern glitt auf vier unter­geklebten, runden Samtstoffbrücken mit einer Fläche von jeweils ca. 1 cm<sup>2</sup> über die Aufnahme­fläche aus Plexiglasfolie. Der Reibungswiderstand zwischen der Kontakt­fläche des Aufnehmers (Samtstoff) und der Aufnahme­fläche (Plexiglasfolie) war minimiert. Es traten keine Vibrationsreize während der Bewegung auf.

Der Arm ruhte unmittelbar vor dem Ellbogengelenk auf einer ca. 5 cm hohen Auflage, die durch einen Kugellageraufbau in der senkrechten Achse drehbar war. Der ge­rahmte Kugellageraufbau bestand aus zwei auf axialem Abstand übereinander an­geordneten Rillenkugellagern und verursachte während einer Bewegung keinen wahrnehmbaren Reibungswiderstand oder Vibrationsreize. Der Arm schwebte frei zwischen Drehpunkt und Aufnehmer. Die Auflage war mit einem unbelastet 8 cm dicken Schaumstoff gepolstert. Ein Stoffärmel verhinderte den direkten Hautkontakt zum Schaumstoff.

#### Vestibuläre Rückmeldung

Der Hocker war feststehend, die Sitzfläche unbeweglich und der Kopf der Vp ruhte auf einer gepolsterten Kinnstütze, um eventuelle, mit der Armbewegung synchrone, axiale Rumpf- und/oder Kopfbewegungen zu verhindern.

#### Propriozeptive Rückmeldung

Die propriozeptive Rückmeldung aus den Muskel- und Gelenkrezeptoren des Halses bzw. des Rumpfes bei simultanen Mitbewegungen des Kopfes bzw. des Körpers war durch die Auflage des Kopfes auf der Kinnstütze, bzw. durch die nicht-drehbare Sitz­fläche des Stuhles minimiert. Die Vp wurde angewiesen, keine zusätzlichen Kopf-, Rumpf- oder Beinbewegungen auszuführen. Dies wurde vom Versuchsleiter zusätz­lich visuell kontrolliert. Die Propriozeption der Arme war nicht beeinflusst.

## 2.7 Versuchsablauf

### Aufnahmebeginn

Jede Bewegung wurde einzeln aufgenommen. Die Vp positionierte den Aufnehmer an einer Anschlagkante an der linken Seite der Aufnahme­fläche. Ein Ton signalisier­te die Aufnahmebereitschaft der Versuchsapparatur. Es kam nicht darauf an, so schnell wie möglich nach dem Tonsignal zu starten, die Aufnahme begann erst mit der Bewegung des Aufnehmers, d. h. der Aufnahmebeginn wurde durch die Vp be­stimmt (schematisierter Versuchsablauf für **Experiment 2 und 3**: s. Abb. 2-01).

Bewegungsbahn

Es wurde eine einfache Extensionsbewegung mit dem rechten, dominanten Arm von links nach rechts ausgeführt. Drehpunkt war das auf dem schaumstoffgepolsterten Kugellager ruhende Ellbogengelenk. Die Vp führte das mit der rechten Hand gehaltene Aufnahmeelement in einer dem natürlichen Bewegungsradius entsprechenden Bewegungsbahn des Armes flach über die Aufnahme­fläche des Digitalisier­tablets. Die Vp wurde angehalten, keine zusätzlichen Bewegungen im Handgelenk auszuführen.

Zielgeschwindigkeit

In **Experiment 1** wurden in einer Einübungsphase jeder Sitzung die Vp durch die verbale Rückmeldung des Versuchsleiters („zu schnell“ / „zu langsam“ / „gut“) in den Zielgeschwindigkeitsbereich (10, 20 oder 40 cm/s) hineingeführt, wobei eine Abweichung von  $\pm 5$  cm/s von der angestrebten Zielgeschwindigkeit toleriert wurde. Die Rückmeldung erfolgte jeweils unmittelbar nach dem Ende einer Bewegung. Die Einübungsphase endete, wenn mindestens 30 Bewegungen ausgeführt und die letzten zehn aufeinanderfolgenden Bewegungen mit „gut“ akzeptiert wurden. Die Vp wurde aufgefordert, die Geschwindigkeit der letzten mit „gut“ rückgemeldeten Einübungsbewegung in den folgenden 90 Bewegungsaufnahmen möglichst genau zu wiederholen und nunmehr ohne Rückmeldung hinsichtlich der Beibehaltung der Bewegungsgeschwindigkeit zu beurteilen.

In **Experiment 2 und 3** erhielt die Vp nach jeder Bewegungsausführung eine visuelle Rückmeldung über die Ziel- und ihre Bewegungsgeschwindigkeit (s. 2.8).

Bewegungsgeschwindigkeit

Die Vp wurde angewiesen, die Geschwindigkeit während des gesamten Bewegungsverlaufes konstant zu halten und mit der Bewegungsgeschwindigkeit die Zielgeschwindigkeit möglichst exakt zu treffen.

In einer einmal begonnenen Bewegungsausführung sollte die Geschwindigkeit beibehalten werden, auch wenn diese nicht der beabsichtigten Geschwindigkeit entsprach. Eine Abweichung von der beabsichtigten Geschwindigkeit wurde jeweils im Anschluß an die Bewegung durch das Geschwindigkeitsurteil (s. u.: Geschwindigkeitsbeurteilung) angegeben.

Die Vp wurde in der Einübungssitzung trainiert, Geschwindigkeitsschwankungen zu vermeiden und die Beschleunigungs- und Abbremsphase zu minimieren. Als Kriterium der Geschwindigkeitskonstanz wurde das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression herangezogen, die über die zurückgelegte Strecke in Abhängigkeit von der Zeit berechnet wurde. Wenn das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  unter 0,98 lag, wurde die Bewegungsaufnahme verworfen (s. 2.10: Messung der Geschwindigkeitskonstanz).

In **Experiment 1** erfolgte die Berechnung erst nach der Versuchsdurchführung. In **Experiment 2 und 3** wurde unmittelbar nach jeder Bewegungsaufnahme das Bestimmtheitsmaß berechnet. Bei Unterschreitung des Kriteriums wurde der Ausschluß der Aufnahme visuell rückgemeldet: Die LC-Blende wurde durchsichtig, auf einem Monitor erschien die Meldung „Geschwindigkeit schwankt“. Die Vp bekam ein in der Frequenz abnehmendes Tonsignal rückgemeldet, die Bewegung wurde nicht gezählt. Die Vp erhielt für diese Bewegung keinen Bonus (s. 2.9: Bonus-Regelung), die Aufnahme mußte wiederholt werden.

Bewegungsstrecke

Die Bewegung sollte maximal nur so weit fortgeführt werden, wie eine konstante Ge-

schwindigkeit ohne zusätzliche Kraftanstrengung oder zusätzliche Bewegungen des Handgelenks möglich war. Die rechte Anschlagkante des Digitalisiertablets wurde so nicht erreicht. Mögliche Störquellen für die kinästhetische Geschwindigkeitswahrnehmung sowie Geschwindigkeitsschwankungen wurden hierdurch vermieden.

### Bewegungsdauer

Die Bewegungsstrecke war nicht festgelegt, damit die Vp keine Schätzung über die zeitliche Dauer der Bewegung als Urteilsgrundlage heranziehen konnte. Die Vp wurde angewiesen, nicht die Dauer, sondern die Geschwindigkeit der Bewegung als Urteilsgrundlage zu nutzen. Ihr wurde zusätzlich mitgeteilt, es habe sich gezeigt, daß sich die Strecken der Bewegungen jeder Vp erheblich unterschieden und daher die Taktik einer Beurteilung über die Dauer der Bewegung zu einer schlechteren Leistung führe.

### Aufnahmeende

Nach dem Bewegungsende beendete das Heben des Zeigefingers von einer Kontaktfläche des Aufnehmers die Bewegungsaufnahme. Ein Ton signalisierte das Ende der Bewegungsaufnahme, die LC-Blende (nur **Experiment 2 und 3**) wurde in einen durchsichtigen Zustand versetzt. Bewegungsbeginn und -ende (s. 2.10) lagen regelmäßig im Intervall zwischen Aufnahmebeginn und -ende.

### Geschwindigkeitsbeurteilung

Nach dem Bewegungs- und Aufnahmeende verblieb die Vp mit dem Aufnehmer in der Endposition, so daß die Bewegungsgeschwindigkeit der Rückbewegung ihr Urteil über die Hinbewegung nicht beeinflusste.

In **Experiment 1** gab die Vp mit der linken Hand über einen Joystick das Urteil ab, ob die Bewegung „gleichschnell“ (Hebeldruck nach oben), oder ob sie „langsamer“ (Hebeldruck nach links) bzw. „schneller“ (Hebeldruck nach rechts) als die Zielgeschwindigkeit war. Die Vp wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das Urteil in Bezug zur individuellen Zielgeschwindigkeit und nicht zur Geschwindigkeit der jeweils unmittelbar vorausgegangenen Bewegung zu treffen war.

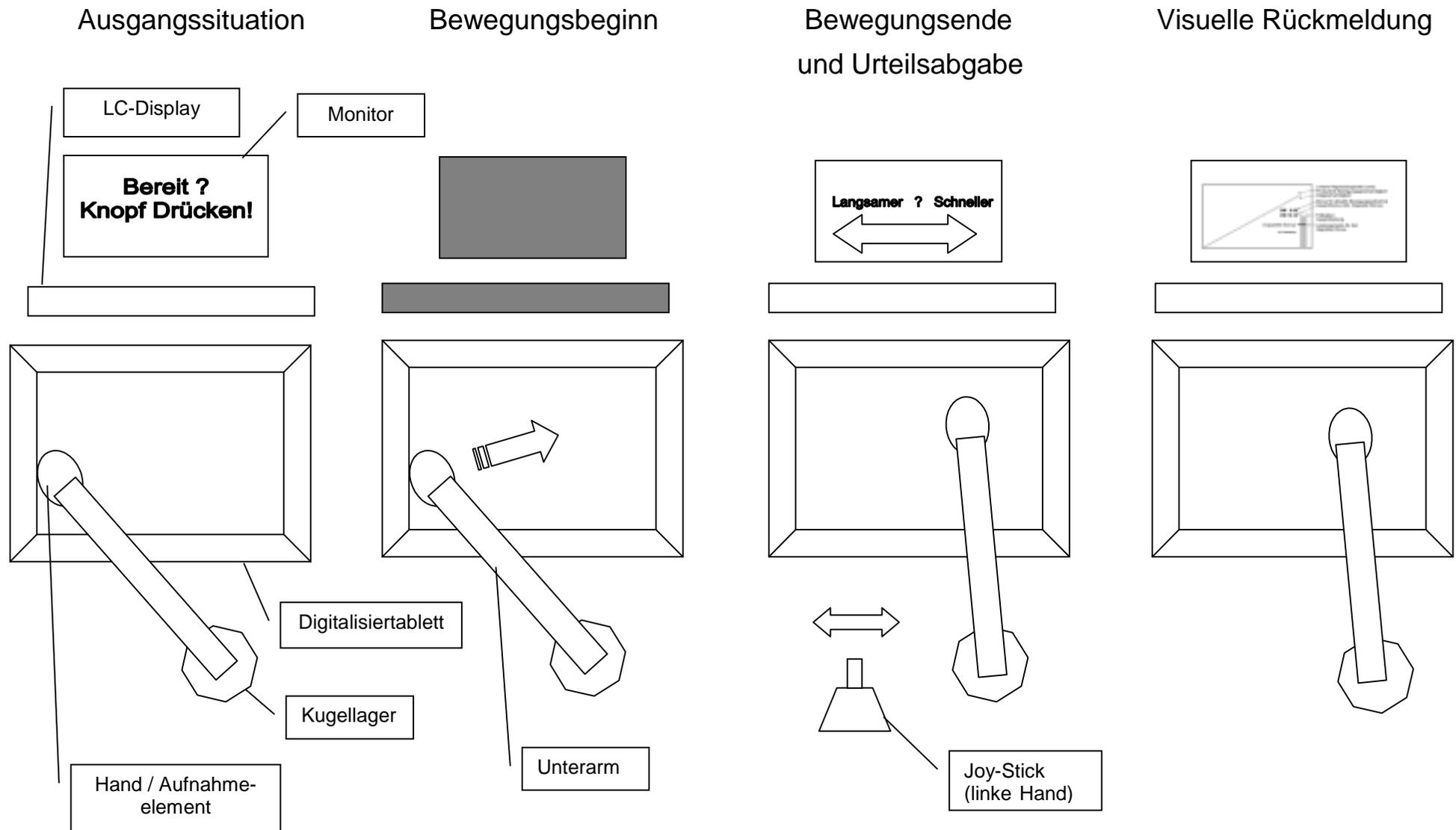
In **Experiment 2 und 3** erschien auf dem Bildschirm eine Eingabeaufforderung mit zwei Richtungspfeilen mit der Beschriftung „langsamer“ und „schneller“. Die Vp gab mit der linken Hand über einen Joystick das Urteil ab, ob die Bewegung „langsamer“ (Hebeldruck nach links) oder „schneller“ (Hebeldruck nach rechts) als die Zielgeschwindigkeit war. Die Eingabe wurde durch ein kurzes, helles Tonsignal bestätigt, das sich von den Tonsignalen der Aufnahmebereitschaft und des Aufnahmeendes unterschied.

In **Experiment 2 und 3** erhielt die Vp anschließend eine visuelle Rückmeldung über den Erfolg ihrer Bewegung und ihres Urteils (s. 2.8) sowie über den erzielten Bonus-Betrag (s. 2.9).

### Fortsetzung der Bewegungsaufnahmen

Nach der Geschwindigkeitsbeurteilung (**Experiment 1**) bzw. der visuellen Rückmeldung (**Experiment 2 und 3**) führte die Vp den Aufnehmer in die Ausgangsposition an der linken Anschlagkante des Digitalisiertablets zurück. Mit der linken Hand bediente die Vp einen Druckknopf am Joystick, der die erneute Aufnahmebereitschaft initialisierte. Die LC-Blende (nur in **Experiment 2 und 3**) wurde in den undurchsichtigen Zustand versetzt. Ein Ton (erstes Tonsignal) signalisierte die Bereitschaft der Versuchsanordnung zur nächsten Bewegungsaufnahme (s. o.: Aufnahmebeginn).

**Abb. 2-01:**  
schematisierter Versuchsablauf für Experiment 2 und 3



Pausen während der Sitzungen

In **Experiment 1 und 2** fand keine Unterbrechung der Sitzungen statt. In **Experiment 3** wurde nach jeweils 100 Bewegungsaufnahmen eine mindestens einminütige Pause eingelegt. Die Leuchtkristallblende wurde durchsichtig, auf dem Monitor erschien eine rückwärts laufende Pausenuhr. Die Vp konnte bei Bedarf durch einen Tastendruck eine Pause selbst aktivieren, der Aufnahme-Zähler für den automatischen Pausenauslöser wurde dann auf Null zurückgestellt.

**2.8 Visuelle Rückmeldung (nur Experiment 2 und 3)**

In **Experiment 2 und 3** erhielt die Vp nach der Geschwindigkeitsbeurteilung einer akzeptierten Bewegungsaufnahme eine visuelle Rückmeldung über ihre Bewegungsgeschwindigkeit und ihr Geschwindigkeitsurteil (Abb. 2-02). Die LC-Blende, die von dem Atari-Rechner mit einer Genauigkeit von 10 ms angesteuert wurde, wurde in den Zustand „durchsichtig“ versetzt.

Die visuelle Rückmeldung wurde auf einem Monitor dargeboten, der auf Augenhöhe in einem Abstand von 57 cm frontoparallel zur Kopfposition ( $1 \text{ cm} \approx 1^\circ$ Sehwinkel) positioniert war.

Sie beinhaltete die graphische Darstellung der unmittelbar zuvor ausgeführten Bewegung in Form der in den Koordinatenursprung verschobenen linearen Regressionsgeraden der zurückgelegten Strecke über die Zeit. Die Steigung der Regressionsgeraden beschrieb die Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s. Die Achsenbeschriftung und -skalierung waren ausgeblendet. Der Vp wurde erklärt, die Gerade verlaufe um so steiler, je schneller die Geschwindigkeit sei und umgekehrt.

Eine zusätzliche, gestrichelt dargestellte „ideale Gerade“ entsprach der linearen Regressionsgeraden der Zielgeschwindigkeit (10, 20 oder 30 cm/s) und ermöglichte den Vergleich zu der ausgeführten Bewegungsgeschwindigkeit. Die Skalierung der Graphik war für jede der drei Zielgeschwindigkeiten so gewählt, daß die Gerade der Zielgeschwindigkeit durch den Nullpunkt ziehend den Bildschirm diagonal teilte. Eine Abweichung der beiden Geraden von 0,1 cm/s war über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum deutlich zu erkennen.

Zusätzlich wurden der Bonusbetrag (s. 2.9) und die Anzahl der bislang absolvierten Bewegungsaufnahmen rückgemeldet (Abb. 2-02).

**2.9 Monetäre Verstärkung: Bonus-Regelung (nur Experiment 2 und 3)**„Einfache Bonus-Regelung“

Die Leistung der Vp in der motorischen Reproduktion der Zielgeschwindigkeit wurde als „efferente“ Leistung, die der Beurteilung der kinästhetisch wahrgenommenen Bewegungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit als „afferente“ Leistung bezeichnet.

Um die Vp zu motivieren

- a) „efferent“ der Zielgeschwindigkeit möglichst nahe zu kommen und trotzdem
- b) „afferent“ möglichst korrekte Urteile in dem Schwellenbereich ihrer Unterscheidungsfähigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit von der Zielgeschwindigkeit abzugeben,

wurde in **Experiment 2 und 3** eine Bonus-Regelung in den Versuchsablauf einge-

bunden. Diese belohnte die kombinierte „effereute“ und „afferente“ Leistung. Die Bonus-Regelung sollte verhindern, daß die Vp nur noch für sie eindeutig zu beurteilende „zu langsame“ oder „zu schnelle“ Bewegungen ausführte, indem richtige Urteile nahe der Zielgeschwindigkeit belohnt wurden:

Die Vp erhielt einen Pfennig pro akzeptierter Bewegungsaufnahme, wenn die ausgeführte Geschwindigkeit im Bereich von  $\pm 10\%$  und drei Pfennig, wenn sie im Bereich von  $\pm 5\%$  der Zielgeschwindigkeit lag. Der Bonus verdoppelte sich auf zwei bzw. sechs Pfennig, wenn zusätzlich das Geschwindigkeitsurteil korrekt war (Tab. 2-02).

In der visuellen Rückmeldung wurde zusätzlich zu dem Einzelbetrag für die Bewegungsaufnahme der bislang erwirtschaftete Gesamtbetrag rückgemeldet (Abb. 2-02). Der Vp wurde nach Abschluß des Experiments der von ihr erzielte Bonus-Betrag ausgezahlt.

**Tab. 2-02:**  
Auszahlungsmatrix der „einfachen Bonus-Regelung“.

		„EFFERENTE AUFGABE“	
		Maximale Abweichung von der Zielgeschwindigkeit:	
„AFFERENTE AUFGABE“	Urteil	10 %	5 %
	falsch	1 Pfennig	2 Pfennig
	richtig	3 Pfennig	6 Pfennig

### „Erweiterte Bonus-Regelung“ (nur **Experiment 3**)

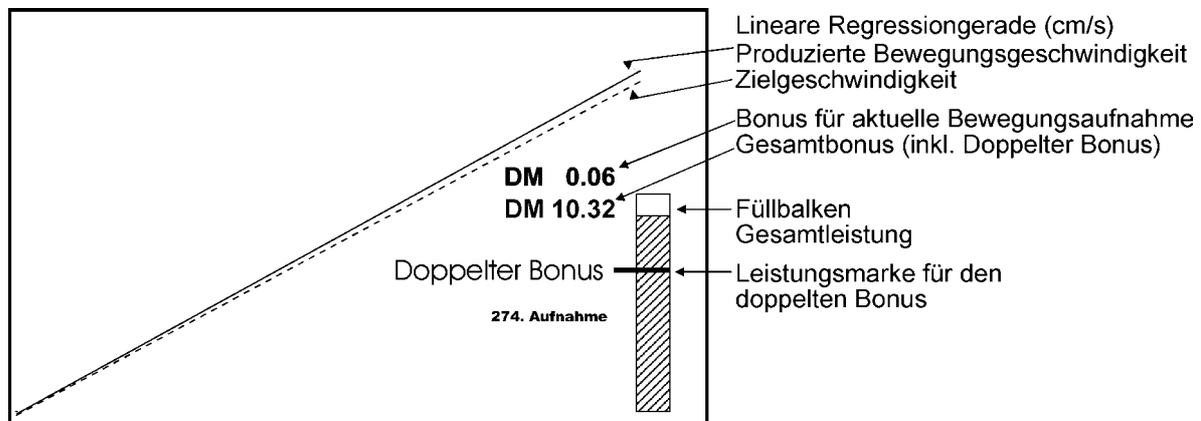
Mit der „einfachen Bonus-Regelung“ (s. o.) wurde a) eine Eingrenzung des produzierten Geschwindigkeitsbereiches um die Zielgeschwindigkeit mit b) möglichst korrekten Urteilen angestrebt.

Mit der „erweiterten Bonus-Regelung“ wurde zusätzlich a) ein gleiches Verhältnis in der Anzahl der „langsamer“- zu den „schneller“-Urteilen und b) ein Mindestanteil an richtigen Urteilen angestrebt. Die erweiterte Bonus-Regelung berücksichtigte somit nicht nur die Leistung für die einzelne Bewegung, sondern auch die Gesamtleistung. Mit der erweiterten Bonus-Regelung war es der Vp möglich, den erzielten Geldbetrag zu verdoppeln. Der doppelte Bonus wurde gewährt, wenn

1. mindestens 66 % der Geschwindigkeitsurteile richtig waren und wenn zusätzlich
2. höchstens 60 % der Bewegungsausführungen als „langsamer“ oder als „schneller“ beurteilt wurden.

Für die Rückmeldung der Gesamtleistung an die Vp wurde in die visuelle Rückmeldung eine Balkengraphik eingebunden (Abb. 2-02). Der Füllungsgrad der Balkengraphik zeigte die aktuelle Gesamtleistung an. 100 % richtige Urteile und eine Verteilung von 50 % zu 50 % von „schneller“- zu „langsamer“-Urteilen stellten eine optimale Leistung dar und führten zu einer vollständigen Füllung des Balkens. Eine in der Balkengraphik eingezeichnete Leistungsmarke zeigte den notwendigen Füllungsgrad für den doppelten Bonus an. Bei Überschreitung der Leistungsmarke wurde die Meldung „doppelter Bonus“ eingeblendet und der erzielte Gesamtbetrag verdoppelt.

Bei Unterschreiten der Leistungsmarke verlor die Vp den doppelten Bonus wieder. Mit dem Füllungsgrad der Balkengraphik wurde der jeweils „schlechtere“ der beiden Kriteriumswerte (Prozentanteil richtiger Urteile oder Verhältnis „langsamer“- zu „schneller“-Urteilen) angezeigt, so daß bei Überschreitung der Leistungsmarke beide Kriterien erfüllt waren.



**Abb. 2-02:**

**Visuelle Rückmeldung mit der Geraden der Zielgeschwindigkeit und der tatsächlichen Bewegungsgeschwindigkeit sowie dem Bonus, dem Leistungsbalken für den doppelten Bonus und der Anzahl der akzeptierten Bewegungsaufnahmen.**

Um taktierendes Verhalten bei der Abgabe des Geschwindigkeitsurteils zu verhindern, wurde der Vp nicht mitgeteilt, welche Leistungsmerkmale in den doppelten Bonus einfließen. Ihr wurde lediglich mitgeteilt, es handle sich um einen allgemeinen Leistungsindex, der die durchschnittliche Leistung widerspiegeln sollte. Der doppelte Bonus werde bei Befolgung der Instruktion erreicht, die Zielgeschwindigkeit möglichst genau zu treffen und die Bewegungsgeschwindigkeit so gut wie möglich zu beurteilen. Die Vp wurde darauf hingewiesen, daß die Füllung des Balkens zu Beginn jedes Versuchsdurchganges von Aufnahme zu Aufnahme stark schwanken könne, sich mit zunehmender Anzahl der Aufnahmen jedoch mit einer einzelnen Aufnahme nur noch in geringerem Ausmaß verändern werde.

Die quantitativen Grenzkriterien für die Zuteilung des doppelten Bonus wurden in Vorversuchen ermittelt: Die Grenze für den Prozentanteil richtiger Urteile sollte einerseits ein Rateverhalten verhindern, andererseits durfte sie das Risiko der Vp nicht bestrafen, sich dem Unsicherheitsintervall zu nähern. Die effiziente Leistung der Annäherung an die Zielgeschwindigkeit benötigte keine weitere Belohnung, der einfache Bonus verhinderte bereits, daß die Vp nur noch für sie eindeutig zu beurteilende schnellere oder langsamere Bewegungen weit außerhalb des Bereichs der Zielgeschwindigkeit ausführte.

In dem Idealfall, daß alle 250 (**Experiment 2**) bzw. 500 (**Experiment 3**) Bewegungsaufnahmen höchstens  $\pm 5\%$  von der Zielgeschwindigkeit abwichen und richtig in Bezug auf die Geschwindigkeitsausführung eingeschätzt wurden, konnte eine Vp in **Experiment 2** theoretisch eine maximale Vergütung in Höhe von 20,00 DM pro Sitzung erzielen (250 Bewegungsaufnahmen  $\times$  0,06 DM + 5,00 DM Grundbetrag) bzw. in Höhe von 60,00 DM pro Sitzung in **Experiment 3** (500 Bewegungsaufnahmen  $\times$  0,06 DM  $\times$  2 Doppelter Bonus). Tatsächlich lagen die Bonusbeträge der einzelnen Vpn zwischen ca. 8,00 DM bis ca. 10,00 DM (**Experiment 2**) und ca. 6,00 DM bis 26,00 DM (**Experiment 3**) pro Sitzung. Jede Vpn absolvierte drei Sitzungen. Das an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf übliche Entgelt für die Teilnahme an einem einstündigen Experiment betrug 7,50 DM.

## 2.10 Auswertung der Rohdaten

### Anzahl der Bewegungsaufnahmen

In **Experiment 1** war die Anzahl der in die Auswertung aufgenommenen Bewegungsaufnahmen sowohl zwischen den Vpn als auch zwischen den Zielgeschwindigkeiten der einzelnen Vpn unterschiedlich, da die Überprüfung der Geschwindigkeitskonstanz mittels des Bestimmtheitsmaßes (s. u.) erst nachträglich ausgeführt wurde. Maximal gingen pro Vp für jede der drei Zielgeschwindigkeiten 90 der 120 Bewegungsaufnahmen in die Auswertung ein.

In **Experiment 2** wurden die ersten zehn Bewegungsaufnahmen einer Sitzung als Einübungstrials aus der Auswertung herausgenommen. Pro Vp gingen für jede der drei Zielgeschwindigkeiten folglich 240 der 250 Bewegungsaufnahmen in die Auswertung ein.

In **Experiment 3** wurden die ersten fünf Bewegungsaufnahmen einer Sitzung sowie die ersten fünf Bewegungsaufnahmen nach einer Pause aus der Auswertung herausgenommen. Regulär waren vier Pausen vorgesehen (s. 2.7). Pro Vp gingen für jede der drei Zielgeschwindigkeiten folglich 475 der 500 Bewegungsaufnahmen in die Auswertung ein. Bei mehr als vier Pausen wurde für jede zusätzliche Pause die Anzahl der Bewegungsaufnahmen um fünf Stück erhöht, so daß weiterhin 475 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit zur Verfügung standen.

### Kontrolle der Bewegungsaufnahmen

Die graphische Darstellung der zurückgelegten Strecke in Millimeter über die Zeit in Millisekunden jeder einzelnen Bewegung wurde auf dem PC-Bildschirm mittels eines Fadenkreuzes mit automatischer Suche des Anfangs- und Endpunktes der Bewegung in Hinblick auf mögliche Artefakte, wie z. B. instruktionswidrige, von der Vp irrtümlich oder unbeabsichtigt ausgeführte Bewegungsanteile („Ausrutscher“), visuell kontrolliert.

### Messung der Bewegung

Eine Bewegung wurde nur als solche akzeptiert, wenn sie über mindestens zwei aneinander angrenzende Koordinatenpunkte des Digitalisiertabletts hinwegging. Hierdurch wurden Bewegungsartefakte in dem Fall ausgeschlossen, daß der Aufnehmer auf der Grenze zwischen zwei benachbarten 0,1 mm-Koordinatenpunkten des Digitalisiertabletts auflag und ein zufälliger Wechsel zwischen den Aufnahmekoordinaten fälschlich eine Hin- und Herbewegung rückmeldete.

### Messung der Bewegungsstrecke

Bei einer als Bewegung akzeptierten Aufnahme wurde beim Wechsel auf einen diagonal benachbarten Koordinatenpunkt der zurückgelegte Weg entsprechend der diagonalen Strecke zugrundegelegt. Auf diese Weise wurden sich kumulierende Meßfehler vermieden.

### Messung der Bewegungsdauer

Kriterium für den Bewegungsbeginn war eine Bewegung des Aufnehmers um mehr als 0,1 mm in 10 ms über zwei Koordinatenpunkte des Digitalisiertabletts hinweg, das Bewegungsende wurde entsprechend mit  $\leq 0,1$  mm in 10 ms definiert.

Bewegungsbeginn und -ende lagen immer im Intervall zwischen Aufnahmebeginn und -ende.

### Messung der Bewegungsgeschwindigkeit

Für jede Aufnahme wurde für den Bewegungsanteil die lineare Regression der zurückgelegten Strecke (Auflösung 0,1 mm) über die Zeit (Auflösung 10 ms) berechnet. Das Steigungsmaß der linearen Regression in cm/s wurde als Maß für die Bewegungsgeschwindigkeit herangezogen.

Das Steigungsmaß der linearen Regression gewährleistete eine datennahe Berechnung der von der  $V_p$  konstant zu haltenden Bewegungsgeschwindigkeit. Das Bestimmtheitsmaß als Kriterium der Geschwindigkeitskonstanz (s. u.) gewährleistete die Güte der Anpassung der Regressionsgeraden an die Meßdaten. Die gegenläufig leichten Beschleunigungs- und Abbremsphasen jeder Bewegung hoben sich bei der Berechnung der Bewegungsgeschwindigkeit mittels der linearen Regression i. d. R. gegenseitig auf, so daß keine als gravierend zu betrachtende Unter- oder Überschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit stattfand (eine Berechnung der mittleren Bewegungsgeschwindigkeit würde aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten während der Beschleunigungs- und Abbremsphase regelmäßig zu einer geringen Unterschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit führen).

### Messung der Geschwindigkeitskonstanz

Die  $V_p$  erhielt die Instruktion, eine in der Geschwindigkeit möglichst konstante Bewegung durchzuführen. Als Kriterium der Geschwindigkeitskonstanz wurde für den Bewegungsanteil jeder Aufnahme die Güte der Anpassung der linearen Regression der zurückgelegten Strecke über die Zeit herangezogen und als Kriterium ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,98 festgelegt.

Mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit sinkt bei gleicher Strecke die Wahrscheinlichkeit, ein höheres Bestimmtheitsmaß zu erreichen, da aufgrund der festen Digitalisierungsrate die Anzahl der Datenpunkte sinkt und damit Geschwindigkeitschwankungen zu einer stärkeren Senkung des Bestimmtheitsmaßes führen. Ein einheitlicher Kriteriumswert von mindestens  $r^2 = 0,98$  hatte sich in Vorversuchen bewährt.

## 2.11 Berechnung der Häufigkeitsverteilungen

### Häufigkeitsverteilungen

Die Häufigkeitsverteilungen der produzierten Bewegungsgeschwindigkeiten wurden mit der Methode „gleitender Mediane“ berechnet. Die Geschwindigkeitswerte je  $V_p$  und Zielgeschwindigkeit wurden in einer aufsteigenden Rangreihe geordnet. Beginnend mit dem kleinsten Geschwindigkeitswert wurde die Anzahl der Bewegungsaufnahmen innerhalb eines Datenfensters einer festgelegten Bewegungsgeschwindigkeit von 1 cm/s ausgezählt. Das Datenfenster wurde in Schritten von 0,1 cm/s über den gesamten Geschwindigkeitsbereich verschoben.

Die individuellen Häufigkeitsverteilungen wurden sowohl über alle Bewegungsaufnahmen einer Zielgeschwindigkeit, als auch getrennt nach Urteilskategorien („langsamer“, „gleichschnell“ und „schneller“ in **Experiment 1**; „langsamer“ und „schneller“ in **Experiment 2 und 3**) bestimmt.

### Mediane und Quartildifferenzen

Zur Beschreibung der Häufigkeitsverteilungen wurden als Lagemaß die Mediane und als Dispersionsmaße die Quartildifferenzen bestimmt (Lienert, 1973).

Die Quartildifferenz umfaßt den in einer Rangreihe sortierten Wertebereich, von dem die niedrigsten 25 % sowie die höchsten 25 % der Werte abgeschnitten wurden, d. h. die Quartildifferenz gibt die Streubreite der 50 % der Rangreihenwerte um den Median wieder.

## 2.12 Bestimmung von Unterschiedsschwellen (nur Experiment 2 und 3)

### Psychometrische Funktionen

Mit der Eingrenzung auf zwei Urteilsalternativen in **Experiment 2 und 3** konnten psychometrische Funktionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit willkürlicher Armbewegungen erstellt werden.

Für jede  $V_p$  und Zielgeschwindigkeit wurde der Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von den Bewegungsgeschwindigkeiten abgebildet. Die Bestimmung des Prozentanteils der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit erfolgte mit der Methode gleitender Mediane: Die Geschwindigkeitswerte je  $V_p$  und Zielgeschwindigkeit wurden in einer aufsteigenden Rangreihe geordnet. Mit dem kleinsten Wert der Rangreihe beginnend, wurde

- a) der Median in cm/s für eine festgelegte Anzahl von aufeinanderfolgenden Datenpunkten der Rangreihe (s. u.: Datenfenster der gleitenden Mediane) bestimmt und
- b) die Anzahl der „schneller“-Urteile in dem Datenfenster ausgezählt.

Das Datenfenster wurde anschließend um einen Datenpunkt auf den zweitniedrigsten Wert verschoben und der Median sowie der Prozentanteil der „schneller“-Urteile für dieses Datenfenster berechnet. Die Prozedur wurde fortgesetzt, bis der größte Wert erreicht wurde.

### Datenfenster der gleitenden Mediane

Mit einem zunehmend größeren Datenfenster für den gleitenden Median nimmt einerseits der Einfluß einzelner Daten auf die Medianbestimmung ab, andererseits nimmt im Gegenzug die Anzahl der zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle insgesamt zur Verfügung stehenden Medianwerte ab. Mit einem größeren Datenfenster ist folglich

- a) eine Glättung der psychometrischen Funktion und
- b) eine Verringerung der Anzahl der zur Verfügung stehenden Datenpunkte für die psychometrische Funktion verbunden.

Gesucht wurde der Wert für die Größe des Datenfensters, bei dem für alle  $V_{pn}$  und Zielgeschwindigkeiten

- a) mit der Glättung der psychometrischen Funktion das Bestimmtheitsmaß der über die psychometrische Funktion gelegten linearen Regression einen Wert von mindestens 0,90 erreichte und
- b) mit der Anzahl der Datenpunkte die psychometrische Funktion zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle den unteren und oberen Unterschiedsschwellenwert überschritt.

Zur Ermittlung der optimalen Datenbreite erfolgte die Analyse für ein Datenfenster von 25, 50, 75 und 100 Datenpunkten. Mit zunehmender Anzahl der Datenpunkte des Datenfensters sank der Einfluß einer einzelnen Bewegungsaufnahme auf den Median der Bewegungsgeschwindigkeit und den Prozentsatz der „schneller“-Urteile

von 4 % (25 Datenpunkte), auf 2 % (50 Datenpunkte), 1,33 % (75 Datenpunkte) und 1 % (100 Datenpunkte).

Im Gegenzug sank mit zunehmender Anzahl der Datenpunkte des Datenfensters die Anzahl der für die psychometrische Funktion zur Verfügung stehenden Medianwerte. Bei 475 in die Auswertung eingehenden Bewegungsaufnahmen in **Experiment 3** sank die Anzahl der Medianwerte von 451 (25 Datenpunkte) auf 426 (50 Datenpunkte), 401 (75 Datenpunkte) und 376 Werte (100 Datenpunkte).

Die Bestimmung der optimalen Anzahl von 75 Datenpunkten für die Berechnung der gleitenden Mediane wurde mit den Daten des dritten Experiments bestimmt (s. 5.3.3: Unterschiedsschwellen und gleitende Mediane).

### Unterschiedsschwellen

Den individuellen psychometrischen Funktionen wurde pro Zielgeschwindigkeit je eine lineare Regression angepaßt. Aus der Vorhersage der linearen Regressionsgleichung wurden die individuellen Schätzwerte für

a) die untere Unterschiedsschwelle (25 % „schneller“-Urteile) und

b) die obere Unterschiedsschwelle (75 % „schneller“-Urteile) entnommen und

aus der Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Schwellenwert das individuelle Unsicherheitsintervall pro Zielgeschwindigkeit und aus dessen Halbierung die entsprechende Unterschiedsschwelle berechnet.

Als Bedingung wurde vorausgesetzt, daß

a) der untere 25 %- und der obere 75 %-Schwellenwert mindestens einmalig von der psychometrischen Funktion überschritten wurden, so daß Vorhersagen nur über einen vorhandenen Wertebereich getroffen wurden und daß

b) das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression mindestens  $r^2 = 0,90$  betrug.

### Steigung der psychometrischen Funktionen

Die Unterschiedsschwelle ist an ein Kriterium gebunden, ab dem eine Unterscheidbarkeit überzufällig nachweisbar ist. Die Steigung einer psychometrischen Funktion zeigt jedoch bereits vor Erreichen des oberen und unteren Unterschiedsschwellenwertes eine zunehmende Wahrnehmungsleistung in dem produzierten Geschwindigkeitsbereich an. In **Experiment 2 und 3** gab der ansteigende Verlauf der psychometrischen Funktion die zunehmende Unterscheidbarkeit der Bewegungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Entfernung von der Zielgeschwindigkeit an.

Die Steigung wurde durch das Steigungsmaß der über die psychometrische Funktion berechneten linearen Regression beschrieben. Es entsprach dem prozentualen Zuwachs der „schneller“-Urteile mit steigender Bewegungsgeschwindigkeit.

### **3. Experiment 1**

### **3.1 Fragestellung**

Wie genau kann eine einfache Armbewegung wiederholt mit jeweils der gleichen Geschwindigkeit ausgeführt werden? Wie gut kann die Geschwindigkeit einer solchen Armbewegung hinsichtlich der Beibehaltung der Geschwindigkeit beurteilt werden?

In **Experiment 1** wurden 12 Vpn unter alleiniger sensorischer Rückmeldung der Muskel- und Gelenkrezeptoren auf die wiederholte Ausführung einer Armbewegung mit einer Zielgeschwindigkeit eintrainiert. Nach jeder Bewegungsausführung beurteilten die Vpn ihre Leistung hinsichtlich der Einhaltung der Zielgeschwindigkeit. („gleichschnell“ oder „zu schnell“, bzw. „zu langsam“).

Drei Zielgeschwindigkeiten wurden in getrennten Sitzungen vorgegeben: „Langsam“ (ca. 10 cm/s), „Mittelschnell“ (ca. 20 cm/s) und „Schnell“ (ca. 40 cm/s).

Erwartet wurden symmetrische Häufigkeitsverteilungen der produzierten Bewegungsgeschwindigkeiten um die Zielgeschwindigkeiten. Die als „zu schnell“ und „zu langsam“ beurteilten Bewegungsausführungen sollten die Randbereiche der Häufigkeitsverteilungen der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsausführungen flankieren und damit den Bereich kennzeichnen, in dem die Vpn keinen Unterschied in der Bewegungsgeschwindigkeit wahrnehmen.

Mit dem Geschwindigkeitsbereich der als eindeutig „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsausführungen wäre eine erste Abschätzung des Geschwindigkeitsbereichs der Unterschiedsschwellen vorgenommen. Es sind bislang keine Untersuchungen bekannt, in denen ein solcher Geschwindigkeitsbereich bestimmt wurde.

### **3.2 Ergebnisse**

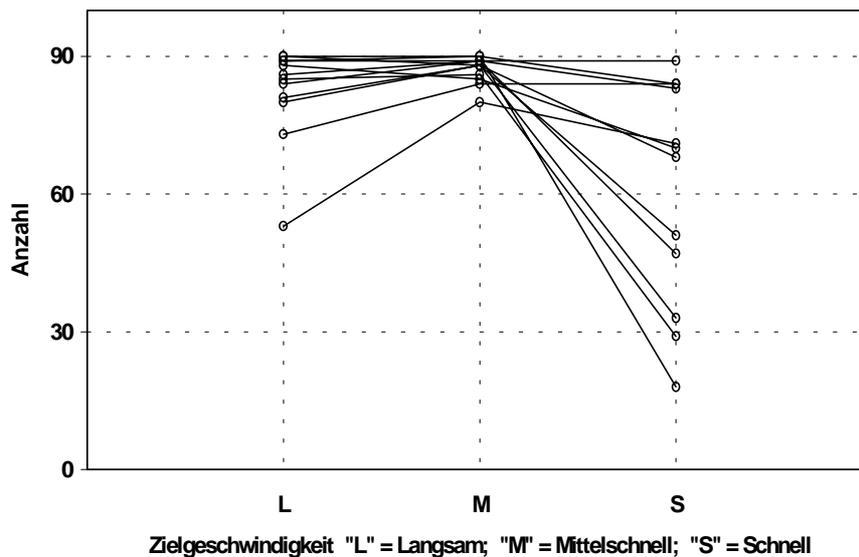
#### **3.2.1. Bewegungsaufnahmen**

##### Anteil der ungültigen Bewegungsaufnahmen

Während für die angestrebte Zielgeschwindigkeit „Langsam“ (10 cm/s) und „Mittelschnell“ (20 cm/s) nur wenige der jeweils 90 Bewegungsaufnahmen aufgrund eines zu niedrigen Bestimmtheitsmaßes (s. 2.10) verworfen wurden (Median 4,5 bzw. 2,0 Bewegungsaufnahmen), stieg der Anteil für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“ (40 cm/s) erheblich an (Median 21,0 verworfene Bewegungsaufnahmen). In Einzelfällen fielen jedoch auch für die Zielgeschwindigkeiten 10 cm/s und 20 cm/s ein Großteil der Bewegungsaufnahmen unter das Kriterium, bzw. nur wenige für die Zielgeschwindigkeit 40 cm/s (Abb. 3-01 und Anhang A: Tab. A-01).

##### Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilkategorie

Von den gültigen Bewegungsaufnahmen lauteten für die angestrebten Zielgeschwindigkeiten 10 cm/s und 20 cm/s annähernd 90 % der Geschwindigkeitsurteile „gleichschnell“ (Mediane über die 12 Vpn), für die Zielgeschwindigkeit 40 cm/s waren es über 80 % (Anhang A: Tab. A-02 b).



**Abb. 3-01:**  
Anzahl der gültigen Bewegungsaufnahmen pro Vp (N=12) und angestrebter Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s), „Mittelschnell“ (20 cm/s), „Schnell“ (40 cm/s)). Maximal 90 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit.

### 3.2.2 Häufigkeitsverteilungen

#### Häufigkeitsverteilungen und Urteilkategorien

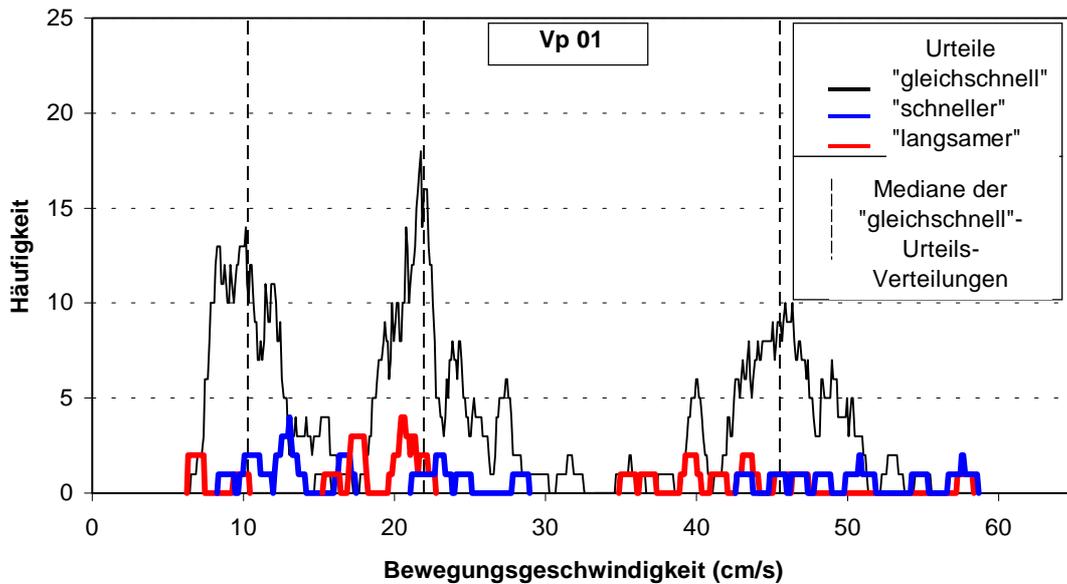
Mit der Methode der gleitenden Mediane (s. 2.11) wurde für jede Vp pro Zielgeschwindigkeit und Urteilkategorie eine Häufigkeitsverteilung der produzierten Bewegungsgeschwindigkeiten erstellt (s. Abb. 3-02 exemplarisch für Vp 1, die Abbildungen für alle 12 Vpn finden sich in Anhang B).

Die Bewegungen, die als „gleichschnell“ beurteilt wurden, verteilten sich annähernd symmetrisch um die individuellen Mediane der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen (senkrecht gestrichelte Linien in Abb. 3-02).

Eine Abgrenzung der Geschwindigkeitsbereiche der als „gleichschnell“-beurteilten Bewegungen gegen die Geschwindigkeitsbereiche, die eindeutig als „schneller“ oder „langsamer“ beurteilt wurden, war jedoch einerseits aufgrund der geringen Anzahl solcher Urteile nicht möglich, andererseits, weil diese Urteile sich nicht systematisch an den Randbereichen der Häufigkeitsverteilung der „gleichschnell“-Urteile ansammelten. Dies galt auch für Vp 2, die mit Abstand den größten Anteil an „langsamer“- und „schneller“-Urteilen aufwies.

Bei mehr als der Hälfte der Vpn war trotz der insgesamt geringen Anzahl der „langsamer“- und „schneller“-Urteile tendenziell zu erkennen, daß sich die „langsamer“-Urteile unterhalb und die „schneller“-Urteile oberhalb des Medianwertes der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen ansiedelten. Bei den anderen Vpn war eine solche Verteilung nicht zu erkennen, bzw. verteilten sich die Urteile unsystematisch über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum (s. Abb. Anhang B).

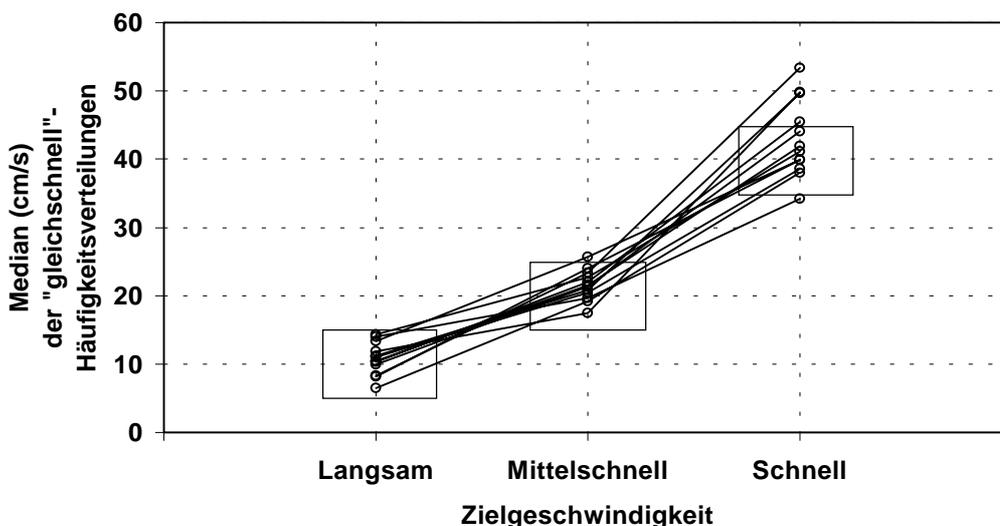
Im folgenden werden aufgrund der geringen Anzahl von „langsamer“- u. „schneller“-Urteilen nur noch die Ergebnisse für die „gleichschnell“-Urteile quantitativ betrachtet.



**Abb. 3-02:**  
 Vp 1: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten pro angestrebter Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s), „Mittelschnell“ (20 cm/s), „Schnell“ (40 cm/s)) und Urteilkategorie („langsamer“ / „gleichschnell“ / „schneller“).

Mediane

Die individuellen Mediane der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen (Abb. 3-03, Anhang A: Tab. A-03) lagen mit wenigen Ausnahmen innerhalb der in den Einübungsbewegungen tolerierten Abweichung von  $\pm 5$  cm/s (in Abb. 3-03 durch Kästchen markiert) von den angestrebten Zielgeschwindigkeiten (10, 20 u. 40 cm/s). Die Mediane und die Gipfel der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen lagen in den meisten Fällen nahe beieinander. Bei ca. der Hälfte der Vpn fielen – insbesondere für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ - mehr oder wenig deutlich sichtbare Doppelgipfel der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen, bzw. Einbrüche in den Häufigkeitsverteilungen in der Nähe der Mediane auf (Abb. 3-02 und Anhang B).



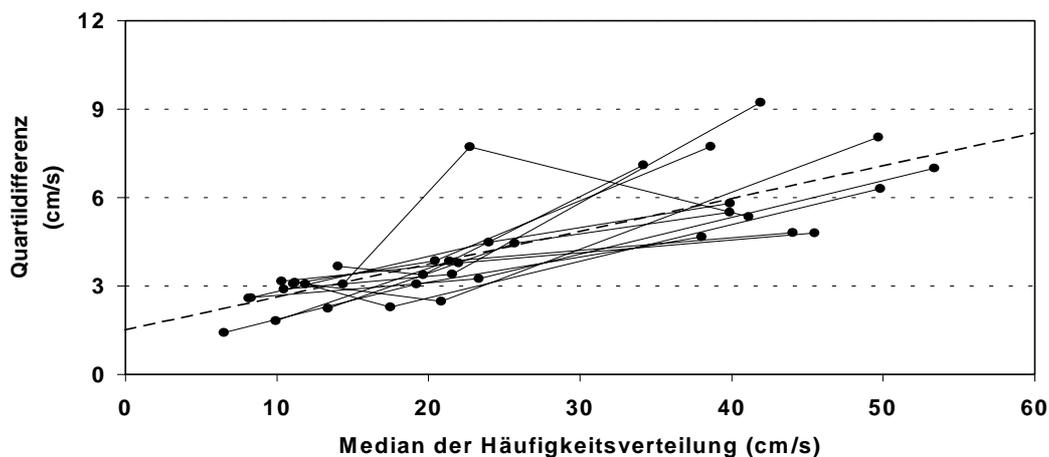
**Abb. 3-03:**  
 Mediane der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen (Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s) pro Vp (N=12) und angestrebter Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s), „Mittelschnell“ (20 cm/s), „Schnell“ (40 cm/s)). Kästchen: Tolerierte Abweichungsbereiche von  $\pm 5$  cm/s von der angestrebten Zielgeschwindigkeit.

### Quartildifferenzen

Für jede „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilung wurde als Kennwert der Streuung der Verteilung und als Maß des wahrnehmbaren Auflösungsvermögens als „gleichschnell“ die Quartildifferenz bestimmt (Abb. 3-04, Anhang A: Tab. A-03). Je kleiner die Quartildifferenz, desto näher liegen die produzierten Geschwindigkeiten an den Zielgeschwindigkeiten. Zu berücksichtigen ist, daß in jede Häufigkeitsverteilung jeder Vp eine unterschiedliche Anzahl von Bewegungsaufnahmen einging.

Der Vergleich der Streuungen der Häufigkeitsverteilungen wurde durch die interindividuell voneinander abweichenden Zielgeschwindigkeiten von den angestrebten Zielgeschwindigkeiten (10, 20, 30 u. 40 cm/s) erschwert. Eine Mittelung der Quartildifferenzwerte war nicht statthaft. Berechnet wurde deshalb die lineare Regression der Quartildifferenzen über die Mediane der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen. Das Steigungsmaß dieser linearen Regressionsgeraden beschrieb eine Verbreiterung der Quartildifferenz um 0,111 cm/s für jeden cm/s Zunahme der Zielgeschwindigkeit (Korrelationskoeffizient 0,80). Der Ordinatenschnittpunkt lag bei einer Quartildifferenz von 1,5 cm/s (Abb. 3-04, Anhang A: Tab. A-04).

Aus der linearen Regression ließen sich für die individuell voneinander abweichenden Zielgeschwindigkeiten der 12 Vpn eine Vorhersage der Quartildifferenzen ableiten. Sie zeigte für die als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsgeschwindigkeiten eine Abweichung von 7,5 % nach oben und nach unten für eine Zielgeschwindigkeit von 40 cm/s an, die auf über 13 % für eine Zielgeschwindigkeit von 10 cm/s anstieg (Anhang A: Tab. A-04).



**Abb. 3-04**  
 Quartildifferenzwerte der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen pro Vp (N=12) in Abhängigkeit von den individuellen Medianen der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen. Gestrichelte Linie: Lineare Regressionsgerade.

### 3.2.3 Geschwindigkeitsverlauf

Zur Beschreibung des Verlaufs der Bewegungsgeschwindigkeiten wurde die lineare Regression der Bewegungsgeschwindigkeit über den Verlauf der Bewegungsaufnahmen berechnet. Die Geschwindigkeitsproduktion war weder durch Adaptationseffekte noch durch ein „Vergessen“ der Zielgeschwindigkeiten beeinträchtigt. Es war bei keiner Vp eine nennenswerte systematische Ab- oder Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit über die in die Auswertung eingegangenen Bewegungsaufnahmen zu verzeichnen. Die Mediane der Ordinatenschnittpunkte entsprachen ungefähr den Zielgeschwindigkeiten. In Anhang C sind die individuellen Verläufe der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsgeschwindigkeiten abgebildet.

Die Steigungsmaße der linearen Regression zeigten für alle drei Zielgeschwindigkeiten eine geringfügige Steigung zwischen 0,00 und -0,02 an (Mediane über die 12 Vpn). Das höchste individuelle negative Steigungsmaß lag bei -0,35 (Vp 4), das höchste positive Steigungsmaß bei +0,50 (Vp 7) (Anhang A: Tab. A-05).

Die Bestimmtheitsmaße zeigten keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Abfolge der Bewegungsaufnahmen an, die Mediane über die 12 Vpn betragen 0,03 bis 0,15 für die drei Zielgeschwindigkeiten. Das mit Abstand höchste individuelle Bestimmtheitsmaß lag bei 0,71 (Vp 9) (Anhang A: Tab. A-05).

### **3.3.4 Befragung der Versuchspersonen**

In einer Befragung im Anschluß an die Versuchsdurchführung beklagten sich alle Vpn unabhängig voneinander über eine ermüdende Monotonie der Versuchsdurchführung, sie hätten spätestens nach ca. der 20. Aufnahme die Bewegungen mehr oder weniger automatisiert ausgeführt und immer wieder bemerkt, daß sie der Aufgabe, die Bewegungsgeschwindigkeit zu beurteilen, keine Aufmerksamkeit widmeten. Die „efferente Aufgabe“ der Bewegungsausführung wurde als „einfach“, die „afferente Aufgabe“ der Geschwindigkeitsbeurteilung hingegen als „schwierig“ bewertet. Bereits nach wenigen Bewegungsausführungen hätten sie sich nicht mehr an die Zielgeschwindigkeit erinnern können und sich mehr oder weniger an der Geschwindigkeit der vorangegangenen Bewegungsausführung orientiert. Die Anzahl von 120 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit wurde als oberste Grenze der Belastbarkeit eingestuft.

## **3.3 Diskussion**

Die produzierten Geschwindigkeitsbereiche um die drei Zielgeschwindigkeiten waren für jede Vp - trotz individueller Überschneidungen der Häufigkeitsverteilungen in den Randbereichen - deutlich voneinander zu trennen, so daß bereits über diese motorisch-efferente Leistung eine Differenzierung in der sensorisch-afferenten Verarbeitung der Geschwindigkeit der Bewegungen festgestellt werden konnte: Die Vpn waren mit ihren Bewegungen efferent in der Lage, Geschwindigkeiten zwischen ca. 10 und 20 cm/s bzw. zwischen ca. 20 und 40 cm/s zu unterscheiden.

Wird zusätzlich das psychophysische Urteil als Maß des Auflösungsvermögens hinzugezogen, spiegelte sich mit den Quartildifferenzen der Häufigkeitsverteilungen der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungen eine überraschend schlechte Leistung wider: die inneren Quartildifferenzen der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungen wiesen eine ca. 13-prozentige Abweichung nach oben und nach unten von der Zielgeschwindigkeit „Langsam“ (10 cm/s), eine ca. 9-prozentige Abweichung nach oben und nach unten von der Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“ (20 cm/s) und eine ca. 7-prozentige Abweichung nach oben und nach unten von der Zielgeschwindigkeit „Schnell“ (40 cm/s) auf (Vorhersage aus der linearen Regression über die Quartildifferenzwerte der 12 Vpn).

Die Erwartung, daß die Häufigkeitsverteilungen der „langsamer“- und „schneller“-Urteile die der „gleichschnell“-Urteile eingrenzen würden, erfüllte sich nicht. Die wenigen Bewegungen, die als „langsamer“ bzw. als „schneller“ beurteilt wurden, verteilten sich innerhalb der Geschwindigkeitsspektren der „gleichschnell“-Verteilungen. Ein Rückschluß auf das tatsächliche kinästhetische Wahrnehmungsvermögen der Bewegungsgeschwindigkeit der eigenen Gliedmaßen konnte nicht vorgenommen werden.

Die deutlich voneinander zu trennenden Häufigkeitsverteilungen der drei Zielgeschwindigkeiten sprachen dafür, daß auf efferenter Seite eine Leistung in der Wiederholung der Zielgeschwindigkeit erbracht wurde, die über der kinästhetisch-afferenten, dem psychophysischen Urteil zur Verfügung stehenden Wahrnehmungsleistung lag. Wenn es den Vpn trotz ihrer Absicht nicht gelungen war, eine annähernd gleichschnelle Bewegung auszuführen und sie diese efferente Fehlleistung wahrnahmen, hätte der Anteil der „schneller“- und „langsamer“-Urteile erheblich höher ausfallen müssen. Zu bedenken war also, ob eine Dissoziation zwischen der kinästhetisch wahrgenommenen Bewegungsgeschwindigkeit und der tatsächlich stattfindenden zentralnervösen Verarbeitung der afferenten Geschwindigkeitsinformationen vorliegt. Dies würde bedeuten, daß die afferente Leistung, die eigene Bewegungsgeschwindigkeit zu beurteilen, schlechter als die efferente Leistung ist, diese zu wiederholen oder aber, daß die efferenten Häufigkeitsverteilungen exakt die afferente Leistung widerspiegeln, Bewegungen „gleichschnell“ zu wiederholen und als solche kinästhetisch wahrzunehmen. In diesem Fall sollte erst eine Verbreiterung des von den Vpn produzierten Geschwindigkeitsbereiches es ermöglichen, auf der Wahrnehmungsebene Unterschiedsschwellen zu erheben.

Gegen diese Erklärungsmöglichkeit sprach allerdings der Umstand, daß die als „schneller“ und „langsamer“ beurteilten Bewegungen innerhalb der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen lagen und nur aufgrund der geringen Anzahl nicht zu einer quantitativen Auswertung zur Verfügung standen. Zu beobachten war außerdem eine gewisse Ansammlung der „langsamer“-Urteile unterhalb und der „schneller“-Urteile oberhalb der jeweiligen individuellen Mediane.

Da der efferenten Leistung, die sich in den Häufigkeitsverteilungen widerspiegelt, gleichsam afferente Information für diese Reproduktionsleistung zur Verfügung gestanden haben muß (außer, es wird die Hypothese einer Efferenzkopie bevorzugt), kann dies auch bedeuten, daß nicht die afferente Leistung an sich unterhalb der efferenten Leistung lag, sondern nur das Urteilsvermögen. Nicht auszuschließen ist, daß die efferente Leistung in der Wiederholung der Bewegungsgeschwindigkeiten durch eine sog. implizite, d. h. nicht-bewußte kinästhetische Gedächtnisleistung begründet und die damit verbundene afferenten Leistung dem sprachlichen Urteil nicht zugänglich ist. Dann sollte die Einführung eines sprachlich nicht verschlüsselbaren, prozeduralen Verhaltensmaßes die kinästhetische Leistungsfähigkeit besser abbilden. Die Reproduktionsleistung der efferenten Häufigkeitsverteilungen stellt bereits ein solches Maß dar. Die Urteilsabgabe über den Joysticks war hingegen sprachlich kodiert („schneller“, „gleichschnell“, „langsamer“).

Des weiteren war nicht auszuschließen, daß - entsprechend z. B. einer begrenzten Zahlenspanne für auditiv-verbales Material - eine kinästhetische Aufmerksamkeitspanne, d. h. die unmittelbare Behaltensleistung für die Geschwindigkeiten aufeinanderfolgender Bewegungen, überschritten wurde.

Ferner war nicht auszuschließen, daß durch die Monotonie der Versuchsdurchführung (s. 3.3.4) ein automatisiertes Urteilsverhalten zugunsten der „gleichschnell“-Urteile bedingt wurde: Dies käme der Erwartungshaltung der Instruktion entgegen und führte zu einer erheblichen Unterschätzung des tatsächlichen kinästhetischen Wahrnehmungsvermögens. Hierfür sprach auch die Beobachtung, daß in der Nähe der Mediane regelmäßig Einbrüche in den Häufigkeitsverteilungen der „gleichschnell“-Urteile zu beobachten waren (s. Abb. in Anhang B). Diese könnten darauf hinweisen, daß sich in diesen Verteilungen zwei efferente „langsamer“- und „schneller“-Verteilungen „verstecken“, die durch das afferente Urteil nicht erfaßt wurden. In diesem Fall wäre durch eine Begrenzung der Urteilsalternativen und/oder durch eine verstärkte Aufmerksamkeit der Vpn auf das afferente Urteil eine Verbesserung der Leistung zu erzielen.

## **4. Experiment 2**

## 4.1 Fragestellung

In **Experiment 1** wiederholten 12 Vpn unter Ausschluß sämtlicher sensorischer Rückmeldung, bis auf die der Muskel- und Gelenkrezeptoren des Armes, 90-fach die Geschwindigkeit einer zuvor eingeübten Armbewegung (Zielgeschwindigkeiten 10, 20 u. 40 cm/s). Wenn man den Geschwindigkeitsbeurteilungen der Vpn in **Experiment 1** folgt, ist das kinästhetische Auflösungsvermögen als bemerkenswert schlecht zu bewerten: Im Median wurden zwischen ca. 80 % und 90 % aller Bewegungen als „gleichschnell“ beurteilt (Anhang D: Tab. D-02 b) ) und die Quartildifferenzen dieser Verteilungen wichen zwischen ca. 7 % (Zielgeschwindigkeit 40 cm/s) und 13 % (Zielgeschwindigkeit 10 cm/s) sowohl nach oben als auch nach unten von der Zielgeschwindigkeit ab (Anhang D: Tab. D-04). Ist die kinästhetische Unterscheidbarkeit der Geschwindigkeit der Eigenbewegungen des Armes wirklich so schlecht?

Einerseits wurde in der Diskussion der Ergebnisse von **Experiment 1** (s. 3.3) angesichts der fast ausschließlich getroffenen „gleichschnell“-Urteile eine Verbreiterung des zu produzierenden Geschwindigkeitsbereichs um die Zielgeschwindigkeit überlegt, bis die Vpn in dessen Randbereichen langsamere bzw. schnellere Bewegungsgeschwindigkeiten eindeutig unterscheiden können.

Andererseits gab es Hinweise auf eine Unterschätzung des „wahren“ kinästhetischen Unterscheidungsvermögens: Die wenigen als „schneller“ und als „langsamer“ beurteilten Bewegungen waren zwar nicht geeignet, eine Eingrenzung des als „gleichschnell“ beurteilten Geschwindigkeitsbereiches vorzunehmen. Tendenziell war jedoch eine Ansiedlung der „langsamer“-Urteile unterhalb sowie der „schneller“-Urteile oberhalb der jeweiligen Zielgeschwindigkeit zu erkennen. Zudem klagten die Vpn über die Monotonie der Durchführung und die fehlende Erinnerung an die genaue Zielgeschwindigkeit.

In **Experiment 2** wurde weiterhin von einer Unterschätzung des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens ausgegangen und die Vpn sollten weiterhin dazu gebracht werden, sich der Zielgeschwindigkeit efferent möglichst zu nähern und trotzdem afferent möglichst viele richtige Urteile über die Bewegungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit abzugeben. Durch folgende Veränderungen sollte eine Leistungsverbesserung erzielt werden:

- a) eine visuelle Rückmeldung sowohl über den Erfolg der Geschwindigkeitsausführung als auch der Beurteilung im Anschluß an jede Bewegungsausführung,
- b) die Begrenzung auf zwei („langsamer“ versus „schneller“) statt drei Beurteilungsmöglichkeiten sowie
- c) ein „Bonus-System“ monetärer Verstärkung, mit dem die Vpn statt nach einem festen Entgelt zusätzlich mit jeder Bewegungsaufnahme für ihre afferente und efferente Leistung bezahlt wurden.

Außerdem wurde die Anzahl der Bewegungsaufnahmen auf 250 pro Zielgeschwindigkeit erhöht, die Geschwindigkeitskonstanz unmittelbar nach jeder Bewegungsaufnahme berechnet und die Zielgeschwindigkeit „Schnell“ von 40 cm/s auf 30 cm/s reduziert. Die Begrenzung auf zwei Urteilsalternativen bot zudem die Möglichkeit, psychometrische Funktionen zur Bestimmung von Unterschiedsschwellen zu erstellen.

## **4.2 Ergebnisse**

### **4.2.1 Bewegungsaufnahmen**

#### Anteil der ungültigen Bewegungsaufnahmen

Die Einführung der unmittelbaren Rückmeldung über Schwankungen der Bewegungsgeschwindigkeit und die Reduzierung der Zielgeschwindigkeit für die Bedingung „Schnell“ von 40 cm/s auf 30 cm/s führte zu einer wesentlichen Zunahme der akzeptierten Bewegungsaufnahmen. Von den insgesamt 4500 Bewegungsaufnahmen (sechs Vpn x drei Zielgeschwindigkeiten x 250 Bewegungsaufnahmen) wurden insgesamt nur 140 Aufnahmen (3,11 %) aufgrund eines Bestimmtheitsmaßes  $< 0,98$  wiederholt (s. 2.10), davon 101 alleine von Vp1 und Vp2 in je einer der drei Sitzungen. Von den restlichen 39 verworfenen Aufnahmen wurden 20 jeweils innerhalb der ersten 30 Bewegungsaufnahmen einer Sitzung gezählt. Mit zunehmender Zielgeschwindigkeit sank die Anzahl der Bewegungsaufnahmen mit einem höheren Bestimmtheitsmaß als  $r^2 = 0,98$  (Anhang D: Tab. D-01).

#### Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilkategorie

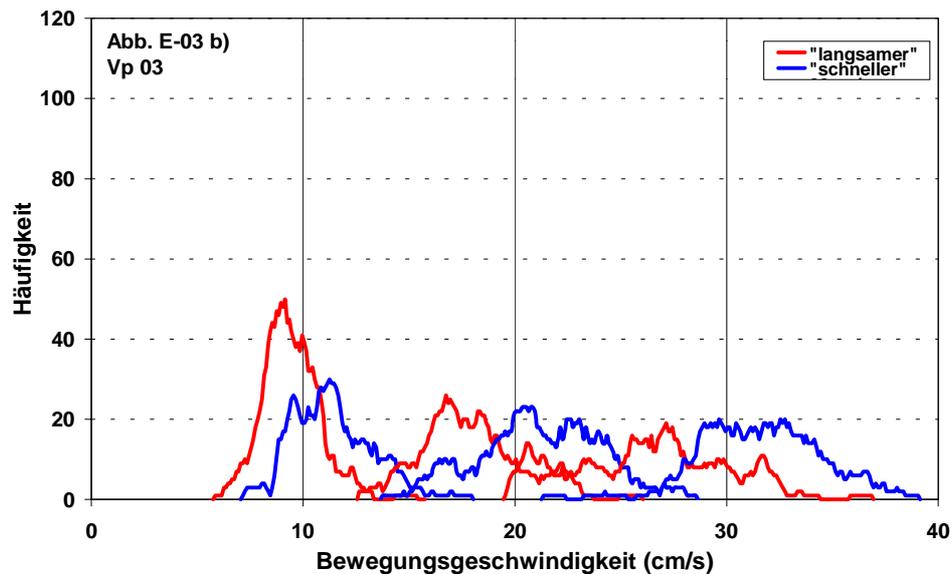
Die Verteilung der „langsamer“- und „schneller“-Urteile über die 240 ausgewerteten Bewegungsaufnahmen war zwischen den Vpn sehr uneinheitlich. Von acht der 18 Häufigkeitsverteilungen (sechs Vpn x drei Zielgeschwindigkeiten) fielen mehr als 66 % der Urteile in eine Urteilkategorie. Im Extremfall (Vp 4) wurden für 97,5 % der Bewegungen nur „langsamer“-Urteile abgegeben (Zielgeschwindigkeit 30 cm/s). Intraindividuell wechselte das bevorzugte Urteil zwischen den Sitzungen (Vp 6) oder die Bevorzugung trat nur in einer Sitzung auf (Vp 1 und Vp 2) (Anhang D: Tab.D-02).

#### Anteil richtiger Urteile

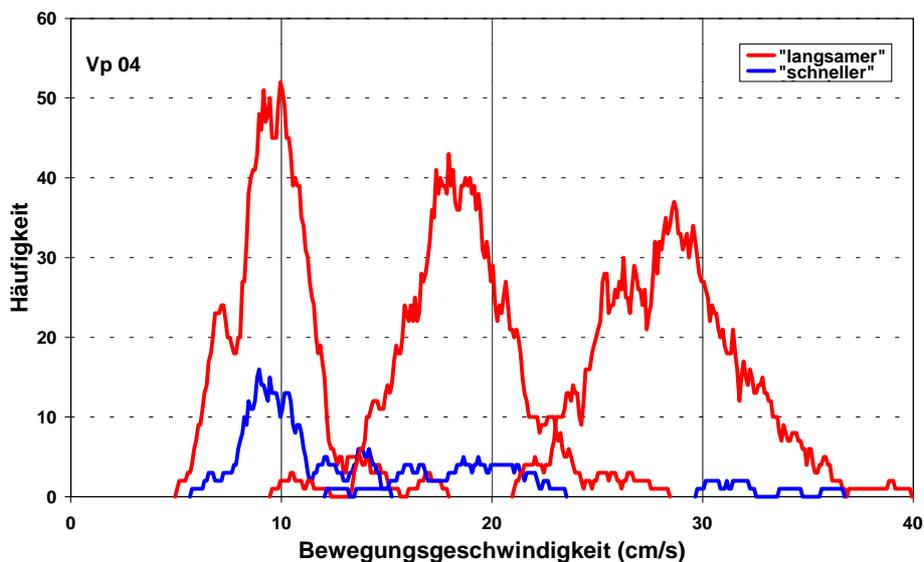
Der Anteil an richtigen Urteilen lag zwischen 62 % und 66 % (Median über die sechs Vpn). Die intra- und die interindividuellen Unterschiede zwischen den Urteilkategorien waren sehr groß. Vp 4 wies z. B. sowohl mit 35 % den geringsten als auch mit 100 % den höchsten Anteil an richtigen Urteilen auf. Allerdings war dies auf die extrem unterschiedliche Anzahl an Bewegungsaufnahmen pro Urteilkategorie zurückzuführen: Vp 4 erzielte mit nur sechs abgegebenen „schneller“-Urteilen 100 % richtige Urteile für diese Urteilkategorie (Abb. 4-02, Anhang D: Tab. D-03).

### **4.2.2 Häufigkeitsverteilungen**

Mit der Methode der gleitenden Mediane (s. 2.11) wurden für jede Vp pro Zielgeschwindigkeit Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten erstellt. In Abb. 4-01 und Abb. 4-02 sind diese (in „langsamer“- und „schneller“-Urteile getrennt) exemplarisch für die „beste“ Vp 3 und die „schlechteste“ Vp 4 abgebildet. Die Abbildungen für alle sechs Vpn finden sich in Anhang E. Für Vp 3 waren als einzige der sechs Vpn Unterschiedsschwellen zu erheben. Vp 4 zeigte aufgrund der fast ausschließlichen „langsamer“-Urteile die auffälligste und „schlechteste“ Beurteilungsleistung. Im Gegensatz zu dieser afferenten Leistung war die efferente Leistung in der Reproduktion der Geschwindigkeiten beider Vp jedoch vergleichbar (Anhang E).



**Abb. 4-01:**  
Vp 03: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten pro Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Urteilkategorie („langsamer“ / „schneller“).



**Abb. 4-02:**  
Vp 04: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten pro Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Urteilkategorie („langsamer“ / „schneller“).

### Mediane der Gesamtverteilungen

Die Hinführung der Vpn auf eine festgelegte Zielgeschwindigkeit mittels der visuellen Rückmeldung war erfolgreich. Die Mediane der Häufigkeitsverteilungen der sechs Vpn (Median über die sechs Vpn) wichen nur geringfügig von den Zielgeschwindigkeiten ab (Anhang D: Tab. D-04, mittlere Spalte):

Median Zielgeschwindigkeit 10 cm/s: 10,3 cm/s;

Median Zielgeschwindigkeit 20 cm/s: 19,74 cm/s;

Median Zielgeschwindigkeit 30 cm/s: 29,23 cm/s.

Die mit Abstand größten individuellen Abweichungen wiesen Vp 4 mit 1,5 cm/s für die Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“ (20 cm/s) und Vp 2 mit 1,6 cm/s für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“ (30 cm/s) auf.

### Mediane der Urteilsverteilungen

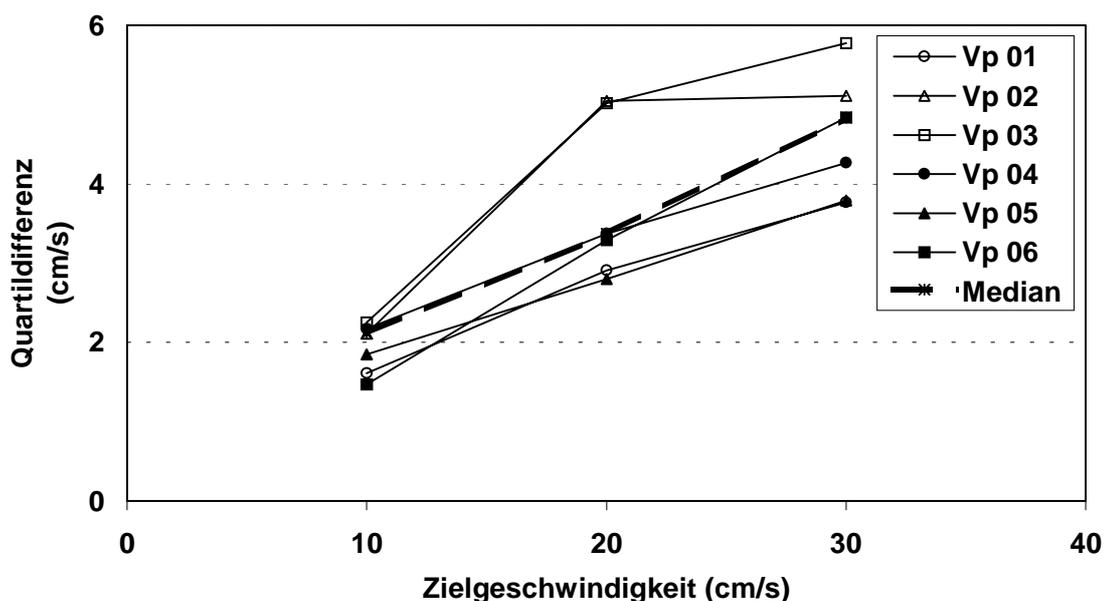
Die Mediane der nach Urteilkategorien aufgeteilten Häufigkeitsverteilungen zeigten ein gewisses kinästhetische Unterscheidungsvermögen an: Sie lagen für jede Vp für die Urteilkategorie „langsamer“ unterhalb und für die Urteilkategorie „schneller“ oberhalb der individuellen Mediane der Gesamtverteilung. Dies galt - mit Ausnahmen für die Häufigkeitsverteilungen der „schneller“-Urteile (Vp 1, Vp 4, Vp 5) - auch in bezug auf die Zielgeschwindigkeiten (Anhang D: Tab. D-04).

Die Differenzen zwischen den Medianen der „schneller“- und „langsamer“-Urteilshäufigkeitsverteilungen lagen zwischen 1,0 und 4,4 cm/s (Median über die sechs Vpn). Es bestanden jedoch große interindividuelle Unterschiede. Zu beachten ist, daß in die Medianbestimmung je nach Urteilkategorie sehr unterschiedliche Anzahlen an Urteilen, im Einzelfall nur sehr wenige Urteile eingingen.

### Quartildifferenzen

Für die Häufigkeitsverteilungen über alle 240 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit wurden - als Kennwert der Streuung der Verteilungen - die Quartildifferenzen bestimmt (Abb. 4-04, Anhang D: Tab. D-05).

Die „efferente“ Leistung der Vpn in der Reproduktion der Zielgeschwindigkeiten ist mit der in **Experiment 1** vergleichbar: Die in **Experiment 1** ermittelten Quartildifferenzen der Häufigkeitsverteilungen der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsausführungen über die 12 Vpn (Anhang A: Tab. A-04) liegen nur geringfügig über denen der Gesamtverteilungen („schneller“- und „langsamer“-Urteile zusammen) der sechs Vpn von **Experiment 2** (Median über die sechs Vpn, s. Anhang D: Tab. D-05). (Zu berücksichtigen ist bei diesem Vergleich die unterschiedliche Anzahl an Vpn sowie die unterschiedliche Anzahl an Bewegungsaufnahmen zwischen **Experiment 1** und **2**. Ferner ist zu beachten, daß die Quartildifferenzwerte in **Experiment 1** der Vorhersage der linearen Regressionsgleichung über alle Vpn entnommen wurden. Zur näheren Erläuterung s. a. Abschnitt 4.3: Diskussion zum Punkt „efferente Leistung“.)

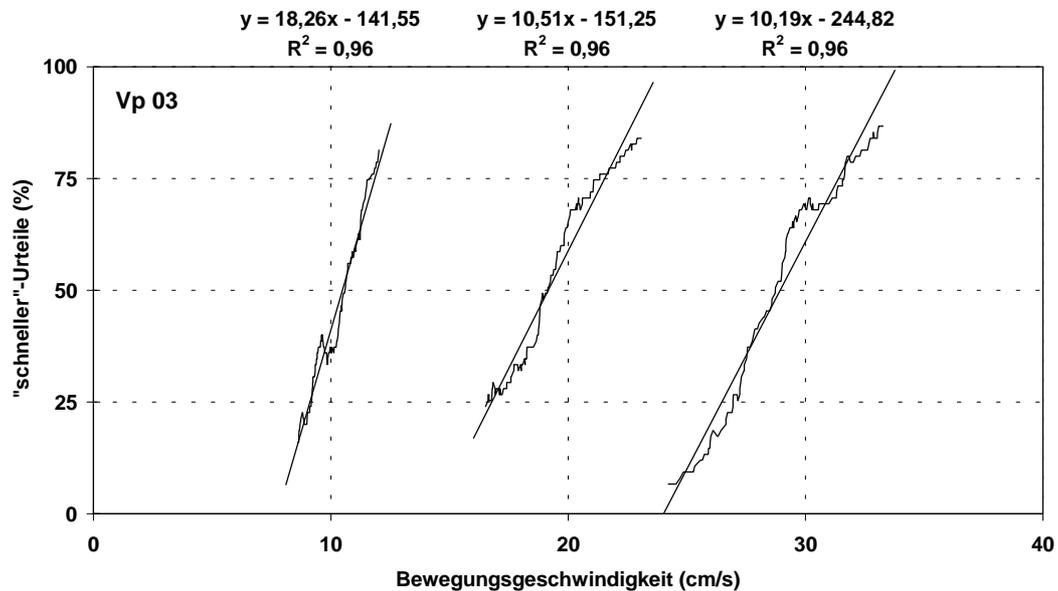


**Abb. 4-03:**

Quartildifferenzwerte für die Gesamtverteilungen („langsamer“ u. „schneller“-Urteile zusammengefaßt) pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s), „Mittelschnell“ (20 cm/s), „Schnell“ (30 cm/s)). Gestrichelte Linien: Mediane über die sechs Vpn.

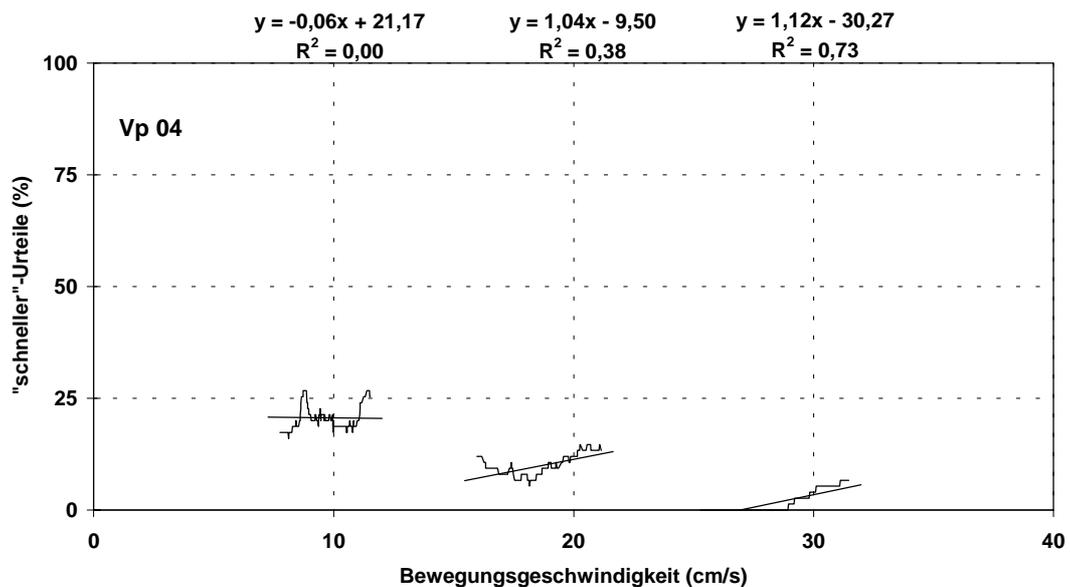
### 4.2.3 Unterschiedsschwellen

Mit der Methode der gleitenden Mediane (s. 2.12) wurden individuelle psychometrische Funktionen des Prozentanteils der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von den Bewegungsgeschwindigkeiten abgebildet (s. Abb. 4-04 und 4-05 exemplarisch für Vp 3 und Vp 4. Die Abbildungen für alle sechs Vpn finden sich in Anhang E).



**Abb. 4-04:**

Vp 3: Psychometrische Funktionen und deren lineare Regressionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen für die drei Zielgeschwindigkeiten: Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit.



**Abb. 4-05:**

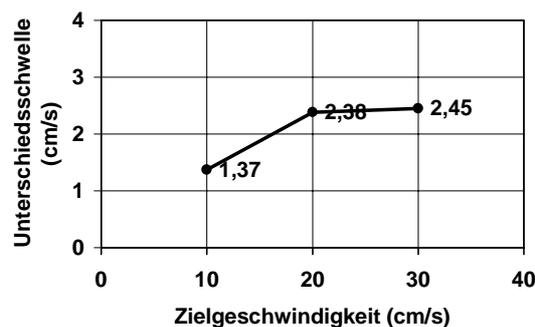
Vp 4: Psychometrische Funktionen und deren lineare Regressionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen für die drei Zielgeschwindigkeiten: Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit.

Mit den psychometrischen Funktionen waren nur für eine (Vp 3) der sechs Vpn Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung des Armes zu erfassen (Abb. 4-04, Anhang D: Tab. D-06). Die psychometrischen Funktionen der anderen fünf Vpn erreichten entweder

- mit weniger als 75 % „schneller“-Urteilen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich nicht den oberen Unterschiedsschwellenwert und/oder
- mit mehr als 25 % „schneller“-Urteilen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich nicht den unteren Unterschiedsschwellenwert.

Die psychometrischen Funktionen dieser fünf Vpn erreichten auch bei einer Begrenzung von 75 auf 50 Rangreihenwerte des Datenfensters zur Berechnung des gleitenden Medians (s. 2.12: Datenfenster des gleitenden Medians) nicht die untere und/oder obere Unterschiedsschwellenwerte. Die psychometrischen Funktionen von Vp 4 verliefen z. B. aufgrund der fast ausschließlichen „langsamer“-Urteile unterhalb der 25 %-Marke (Abb. 4-05).

Die Unterschiedsschwellen spiegeln die „afferente“ Leistung, die Quartildifferenzen die „efferente“ Leistung in der Reproduktion der Zielgeschwindigkeit wider. Die Unterschiedsschwellen von Vp 3 wichen um 8,2 % für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“, und um 13,7 % für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ von der Zielgeschwindigkeit ab.



**Abb. 4-06:**  
Unterschiedsschwellen von Vp 3.

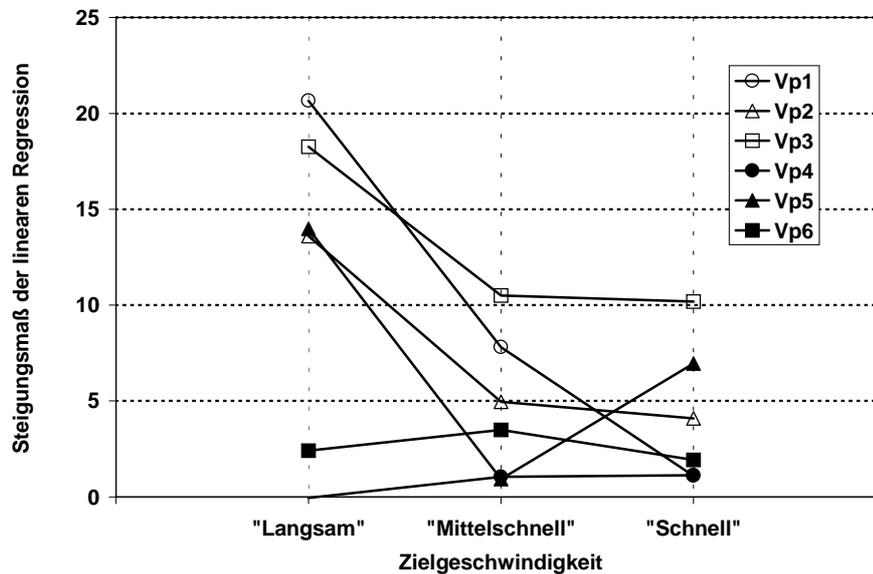
#### **4.2.4 Steigungen der psychometrischen Funktionen**

Jeder psychometrischen Funktion wurde eine lineare Regression angepaßt. Die Steigungsmaße dieser linearen Regressionen stellen unabhängig vom Erreichen der unteren und/oder oberen Unterschiedsschwelle einen Kennwert für eine zunehmende kinästhetische Unterscheidbarkeit der eigenen Bewegungsgeschwindigkeit von der jeweiligen Zielgeschwindigkeit dar (s. 2.12).

Sowohl der Betrag als auch der Verlauf der Steigungsmaße über die Zielgeschwindigkeit war zwischen den Vpn sehr uneinheitlich. Insgesamt war ein Trend in Richtung abnehmender Steigungsmaße mit zunehmender Zielgeschwindigkeit zu verzeichnen (Abb. 4-07, Anhang D: Tab. D-07).

Die Steigungsmaße zeigten nicht alleine für Vp 3, für die Unterschiedsschwellen berechnet werden konnten, sondern auch für einzelne Zielgeschwindigkeiten anderer Vpn (Vp 1, Vp 2 und Vp 5 insbesondere für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“) eine systematische Zunahme der kinästhetischen Unterscheidbarkeit der Bewegungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Entfernung von der Zielgeschwindigkeit an. Den höchsten Steigungswert verzeichnete Vp 1 für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ mit einem Steigungsmaß von 20,66 Prozent Zunahme an „schneller“-Urteilen pro cm/s Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit. Dieser Wert lag über dem von Vp 3.

Hingegen lagen bei Vp 4 und Vp 6 sowie für einzelne Zielgeschwindigkeiten bei Vp 1, Vp 2 und Vp 5 die Steigungsmaße unter 5 % Zuwachs an „schneller“-Urteilen pro cm/s Zunahme an Bewegungsgeschwindigkeit. Für Vp 4 trat für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ sogar eine negative Steigung auf.



**Abb.: 4-07:**

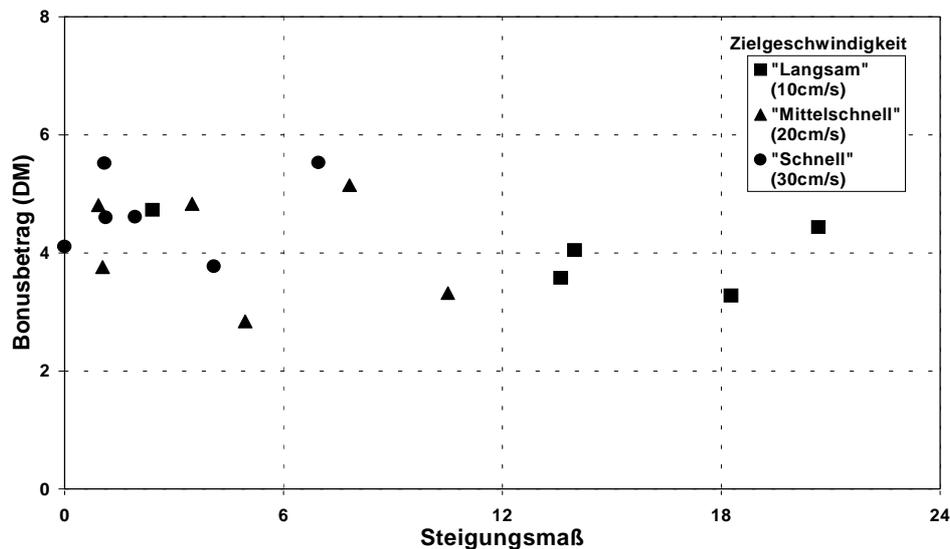
Steigungsmaße der linearen Regressionen der psychometrischen Funktionen pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s)).

#### 4.2.5 Geschwindigkeitsverlauf

Zur Beschreibung einer möglichen systematischen Veränderung der Bewegungsgeschwindigkeiten wurde über die 240 in die Auswertung eingegangenen Aufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit jeweils eine lineare Regression berechnet. Es war bei keiner Vp eine bedeutsame Ab- oder Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit zu verzeichnen. Adaptationseffekte oder Ermüdungserscheinungen waren nicht festzustellen. Die individuellen Steigungsmaße der linearen Regression lagen zwischen -0,01 und +0,01 cm/s pro Bewegungsaufnahme. Die Bestimmtheitsmaße zeigten keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Abfolge der Bewegungsaufnahmen an. Der individuell höchste Wert für das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,07 (Vp 6, Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“). Die Mediane der Ordinaten Schnittpunkte wichen weniger als 0,5 cm/s von den Zielgeschwindigkeiten ab (Median über die sechs Vpn). Die mit Abstand größte individuelle Abweichung (Vp 4) betrug 2,42 cm/s für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“ (Anhang D: Tab. D-08).

#### 4.2.6 Monetäre Verstärkung: Bonusbeträge

Zusätzlich zum Grundbetrag in Höhe von 5,- DM erzielten die Vpn pro Sitzung einen Bonus zwischen 3,85 DM und 6,39 DM. Es war kein Zusammenhang zwischen Bonusbeträgen, Zielgeschwindigkeiten und Steigungen der psychometrischen Funktionen zu erkennen (Abb. 4-08, Anhang D: Tab. D-09).



**Abb. 4-08:**

Zusammenhang zwischen Bonusbetrag (in DM) und Steigungsmaß der linearen Regression über die psychometrischen Funktionen pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit.

#### **4.2.7 Befragung der Versuchspersonen**

Im Gegensatz zu **Experiment 1**, in dem sich die Vpn über die Monotonie der Versuchsdurchführung beklagten, bezeichneten die Vpn die Versuchsdurchführung von **Experiment 2** als „interessant“ oder „lustig“. Wie in **Experiment 1** wurde die efferente Aufgabe der Bewegungsausführung als „einfach“, die afferente Aufgabe der Geschwindigkeitsbeurteilung hingegen als „schwierig“ bewertet. Eine spürbare Gedächtnisbelastung betreffs der Zielgeschwindigkeiten wurde auch nach gezielten Rückfragen nicht angegeben. Die Anzahl von 250 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit wurde als akzeptabel bewertet. In **Experiment 1** beklagten sich die Vpn über die zu große Anzahl von 120 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit.

### **4.3 Diskussion**

#### **Veränderungen in Experiment 2**

Die visuelle Rückmeldung ermöglichte das Eintrainieren von gleichen Zielgeschwindigkeiten für alle Vpn und minimierte die Beanspruchung der Gedächtnisleistung bezüglich der Zielgeschwindigkeit.

Das Bonus-System belohnte die Vpn mit jeder Bewegungsaufnahme für eine erfolgreiche Annäherung an die Zielgeschwindigkeit und damit verbunden für eine immer schwieriger werdende Geschwindigkeitsbeurteilung.

Die Einführung der visuellen Rückmeldung und des Bonus-Systems gaben dem Experiment darüber hinaus den Charakter eines Geschicklichkeitsspiels. **Experiment 2** wurde von den Vpn - im Gegensatz zu den Vpn von **Experiment 1** - „gerne“ durchgeführt (s. 4.2.7).

Mit dem Wegfall des Urteils „gleichschnell“ war ein Strategiewechsel in der Versuchsdurchführung verbunden. In Erwartung einer guten Fähigkeit, Bewegungsge-

schwindigkeiten zu wiederholen und zu beurteilen, sollten in **Experiment 1** die „langsamer“- und „schneller“-Urteile dazu dienen, die entgegen der Absicht und Instruktion zu schnell oder zu langsam ausgeführten Bewegungen durch die Vpn selbst zu markieren. In **Experiment 2** wurde den Vpn nur noch die Möglichkeit geboten, ihre Bewegungsgeschwindigkeit als „langsamer“ oder „schneller“ als die Zielgeschwindigkeit zu beurteilen. Mit nur noch zwei Urteilsalternativen sollte aus dem „Urteilsrauschen“ heraus über eine psychometrische Funktion eine Unterschiedsschwelle „gefiltert“ werden.

### Efferente Leistung

Gegenüber **Experiment 1** wurde keine nennenswerte Verbesserung der efferenten Leistung, d. h. der Annäherung an die Zielgeschwindigkeiten, erzielt: Die Quartildifferenzen der Häufigkeitsverteilungen („langsamer“- und „schneller“-Urteile zusammen, Anhang D: Tab. D-05., Mediane über die sechs Vpn) lagen nur geringfügig unter den in **Experiment 1** bestimmten Quartildifferenzwerten für die Häufigkeitsverteilung der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungen (Anhang A: Tab. A-04).

(Zu berücksichtigen ist, daß die Quartildifferenzwerte von **Experiment 1** aus der Vorhersage der linearen Regressionsgleichung über alle 12 Vpn stammten, da eine Mittelung der Quartildifferenzen aufgrund der voneinander abweichenden Zielgeschwindigkeiten der einzelnen Vpn nicht statthaft war. Zudem wurden aufgrund der geringen Anzahl von „langsamer“- und „schneller“-Urteilen nur die Häufigkeitsverteilungen der „gleichschnell“-Urteile ausgewertet (s. 3.2.2: Quartildifferenzen). In **Experiment 2** war es hingegen möglich, die Mediane der Quartildifferenzen aus den Häufigkeitsverteilung aller Urteile („langsamer“ und „schneller“) für die drei identischen Zielgeschwindigkeiten der sechs Vpn zu bestimmen. Außerdem ging in **Experiment 2** eine weitaus höhere Anzahl an Bewegungsaufnahmen als in **Experiment 1** in die Auswertung ein.)

### Afferente Leistung

Die Einführung der monetären Verstärkung mit einem Bonus-System und die Begrenzung auf zwei Urteilsalternativen führte auch zu keiner wesentlichen Verbesserung der afferenten Urteilsleistung: Wählten die Vpn in **Experiment 1** in über 80 % der Fälle das Urteil „gleichschnell“ (Median über die 12 Vpn), entschied sich in **Experiment 2** ohne diese Urteilsmöglichkeit ca. die Hälfte der Vpn bevorzugt entweder für „schneller“- oder für „langsamer“-Urteile. In diesen Fällen verliefen die psychometrischen Funktionen bei einseitiger Bevorzugung des „schneller“-Urteils oberhalb, bei einseitiger Bevorzugung des „langsamer“-Urteils unterhalb des Anteils von 50 % „schneller“-Urteilen (Anhang D: Tab. D-02).

In den Fällen, in denen eine annähernd gleiche Anzahl von „langsamer“- und „schneller“-Urteilen abgegeben wurde, lagen zumeist zu wenige richtige Beurteilungen vor: Die psychometrischen Funktionen erreichten, ausgehend von einem Rate-niveau von 50 %, nicht den unteren 25 %- und/oder nicht den oberen 75 %-Schwellenwert. Möglicherweise gab ein Teil dieser Vpn, anstatt bevorzugt in eine Richtung zu urteilen - unabhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit - mehr oder weniger abwechselnd „langsamer“- und „schneller“-Urteile ab.

Für einzelne Vpn war jedoch in dem produzierten Geschwindigkeitsbereich ein deutlicher Anstieg der psychometrischen Funktionen zu verzeichnen, ohne daß die oberen und unteren Unterschiedsschwellenwerte erreicht wurden. Dieser Anstieg wies auf eine zunehmende kinästhetische Unterscheidbarkeit der Bewegungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der Zielgeschwindigkeit hin.

### Planung von Entscheidungsexperimenten

Die erfolgreiche Erhebung von Unterschiedsschwellen für eine Vp, der Anstieg der psychometrischen Funktionen für weitere Vpn sowie die Abweichung der Mediane der „langsamer“- von denen der „schneller“-Urteilshäufigkeitsverteilungen in **Experiment 2** sprachen auch weiterhin für eine Unterschätzung des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens.

Außerdem kam der Verdacht auf, daß das verwendete Bonus-System nicht geeignet war, die Leistung zu erhöhen. Vp 4 baute z. B. „efferent“ zwar symmetrische Häufigkeitsverteilungen um die Zielgeschwindigkeiten auf, gab aber in einer Bedingung 97,8 % „langsamer“-Urteile ab. Die psychometrischen Funktionen dieser Vp verliefen unterhalb der 25 %-Grenze des Anteils der „schneller“-Urteile. Trotzdem erzielte sie gegenüber „besseren“ Vpn einen vergleichbar hohen Auszahlungsbetrag, da die efferente Leistung bereits mit dem Bonus-System belohnt wurde und zusätzlich eine 50-prozentige Chance für zufällig richtige Urteile bestand. Dies trifft nicht nur für Vpn mit einseitigen, sondern auch für solche mit wechselnden Urteilsabgaben zu. Vp 4 erwirtschaftete einen ähnlich hohen Bonus wie diejenigen Vpn, die sich bemühten, nahe an das Unsicherheitsintervall zu gelangen und das Risiko eines falschen Urteils auf sich nahmen. Der gesamte Bonus-Betrag fiel zudem meist geringer als der Grundbetrag in Höhe von 5,00 DM aus, so daß eine Kosten-Nutzen-Analyse bei der Umsetzung der Instruktion eindeutig zu Lasten der von den Vpn als „schwierig“ eingestuften efferenten Aufgabe ging. Zwischen den Vpn bestanden trotz großer Leistungsunterschiede keine entsprechenden Unterschiede im ausgezahlten Bonusbetrag (Abb. 4-08, Anhang D: Tab. D-09).

Wenn die „efferente“ Instruktion, mit der eigenen Bewegungsgeschwindigkeit die Zielgeschwindigkeit möglichst exakt zu treffen, befolgt wurde, war zu erwarten, daß die Vpn, wenn die soeben ausgeführte Bewegung zu schnell war, die nächste Bewegung langsamer auszuführen suchten und umgekehrt, so daß sie um die Zielgeschwindigkeit „pendelten“. Die Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten sollten sich symmetrisch um die jeweilige Zielgeschwindigkeit aufbauen. Wenn die „afferente“ Instruktion, die eigene Bewegungsgeschwindigkeit möglichst richtig in bezug auf die Zielgeschwindigkeit zu beurteilen, befolgt wurde, war ein Mindestanteil an richtigen Urteilen zu erwarten. Mit der kombinierten Umsetzung der „efferenten“ und „afferenten“ Instruktion war zu erwarten, daß die nach Urteilkategorien getrennten Bewegungsaufnahmen ungefähr gleich häufig auftreten und sich deren symmetrische Häufigkeitsverteilungen entsprechend der Urteilsrichtung um einen Geschwindigkeitsbetrag voneinander versetzt um die Zielgeschwindigkeit herum aufbauen.

In **Experiment 3** wurde deshalb eine „erweiterte Bonusregelung“ eingeführt, mit der nicht nur die Leistung für die einzelne Bewegungsaufnahme, sondern auch für die Gesamtleistung belohnt wurde. Damit sollte es möglich sein, sowohl einen Mindestanteil richtiger Urteile zu erreichen als auch das Verhältnis von „schneller“- zu „langsamer“-Bewegungsausführungen zu kontrollieren.

## **5. Experiment 3**

## **5.1 Fragestellung**

Trotz der aus **Experiment 1** abgeleiteten Veränderungen war in **Experiment 2** mit a) der Einführung einer monetären Verstärkung mit einem Bonus-System, b) der Einführung einer unmittelbaren visuellen Rückmeldung, c) der Begrenzung auf zwei Urteilsalternativen, d) der Erhöhung von 120 auf 250 Bewegungsaufnahmen und e) der sofortigen Rückmeldung einer Geschwindigkeitsschwankung keine wesentliche Veränderung in den Ergebnissen festzustellen: Die Vpn produzierten mit ihren Bewegungsgeschwindigkeiten zwar annähernd symmetrische Häufigkeitsverteilungen um die Zielgeschwindigkeiten, bevorzugten jedoch in den meisten Fällen auch mit zwei statt drei Urteilsalternativen weiterhin eine Urteilkategorie. Mit den Anteilen an richtigen und falschen Urteilen waren für fünf der sechs Vpn keine Unterschiedsschwellen zu erheben.

Ist die kinästhetische Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegungen der Gliedmaßen doch schlechter als vermutet und durfte der Bereich der produzierten Bewegungsgeschwindigkeiten nicht auf die Zielgeschwindigkeit eingeeengt werden, sondern hätte er im Gegenteil verbreitert werden müssen?

Besteht eine Dissoziation zwischen einem „wahren“ Auflösungsvermögen der Bewegungsgeschwindigkeit und der wahrnehmbaren, dem psychophysischen Urteil zugänglichen Bewegungsgeschwindigkeit? Oder war der gewählte methodische Zugang, z. B. bezüglich der Art der Erfassung und Rückmeldung der Bewegungsgeschwindigkeit, an sich nicht geeignet?

Mit **Experiment 3** wurde der eingeschlagene Weg weiterverfolgt, der von einer Unterschätzung des kinästhetischen Wahrnehmungsvermögens ausging. Die erfolgreiche Erhebung von Unterschiedsschwellen für eine Vp in **Experiment 2**, die deutliche Zunahme in der Steilheit der psychometrischen Funktionen weiterer Vpn sowie die Abweichung der Mediane der individuellen „langsamer“- von den „schneller“-Urteilsverteilungen aller Vpn wiesen auf ein höheres kinästhetisches Unterscheidungsvermögen in dem produzierten Geschwindigkeitsbereich hin.

In **Experiment 2** wurde zudem deutlich, daß die Instruktion nicht hinreichend befolgt wurde, da ansonsten zu erwarten gewesen wäre, daß die Bedingungen für die mögliche Erhebung von Unterschiedsschwellen erfüllt wurden, d. h.

- a) ein über dem Zufallsniveau liegender Mindestanteil an richtigen Urteilen gefällt wurde und
- b) das Verhältnis des Anteils an „langsamer“- zu „schneller“-Urteile nur geringfügig von 1:1 abwich.

Um die Einhaltung dieser Bedingung zu kontrollieren, wurde in **Experiment 3** ein „erweitertes Bonus-System“ eingesetzt (s. 2.9), das nicht mehr nur die einzelne Bewegungsaufnahme hinsichtlich der kombinierten efferenten und afferenten Leistung belohnte, sondern zusätzlich die Gesamtleistung hinsichtlich des kombinierten Anteils an richtigen Urteilen und des Verhältnisses von „schneller“- zu „langsamer“-Urteilen.

Das „erweiterte Bonus-System“ war damit auch als Kriterium dafür einsetzbar, ob die Instruktion befolgt wurde. Der Charakter eines Geschicklichkeitsspiels wurde zusätzlich verstärkt.

Darüber hinaus wurde die Anzahl der Bewegungsaufnahmen von 250 auf 500 pro Zielgeschwindigkeit verdoppelt.

## 5.2 Ergebnisse

### 5.2.1 Bewegungsaufnahmen

#### Anteil der ungültigen Bewegungsaufnahmen

Der Prozentsatz der aufgrund des Kriteriums der Geschwindigkeitskonstanz (s. 2.10) verworfenen Bewegungsaufnahmen (Bestimmtheitsmaß  $r^2 < 0,98$ ) betrug 2,85 % (513 von 18.000 Bewegungsaufnahmen). In **Experiment 2** betrug der Anteil 3,11 %. Es traten große interindividuelle Unterschiede auf, mit einer Anzahl von 95 verworfenen Aufnahmen wiederholte Vp 10 die meisten, Vp 5 mit einer einzigen die wenigsten Bewegungsaufnahmen (Anhang F: Tab. F-01).

#### Anteil der Bewegungsaufnahmen pro Urteilkategorie

Mit der Kontrolle des Prozentanteils der „schneller“- und „langsamer“-Urteile über die „erweiterte Bonus-Regelung“ (s. 2.9) war gegenüber **Experiment 2** ein wesentlich ausgeglicheneres Verhältnis zwischen „schneller“- und „langsamer“-Urteilen zu verzeichnen. Nur dreimal wurde die Bedingung für den „doppelten Bonus“ nicht erfüllt, höchstens 60 % der Urteile für eine der beiden Urteilsalternativen zu wählen. Wie die Befragung im Anschluß an das Experiment ergab, hatte keine der 12 Vpn erkannt, daß das Verhältnis zwischen den Urteilkategorien in die Berechnung des doppelten Bonus einfloß (Anhang F: Tab. F-02).

#### Anteil richtiger Urteile

Über die „erweiterte Bonus-Regelung“ (s. 2.9) wurde auch der Mindestanteil richtiger Urteile (66 %) für die Gesamtverteilung kontrolliert. Der Anteil richtiger Urteile lag über 70 % (Median über die 12 Vpn, Anhang F: Tab. F-03) und damit deutlich über den Ergebnissen aus **Experiment 2** (s. Anhang D, Tab. D-03). Nur einmal wurde der Kriteriumswert von einer Vp (Vp 11) knapp unterschritten.

### 5.2.2 Häufigkeitsverteilungen

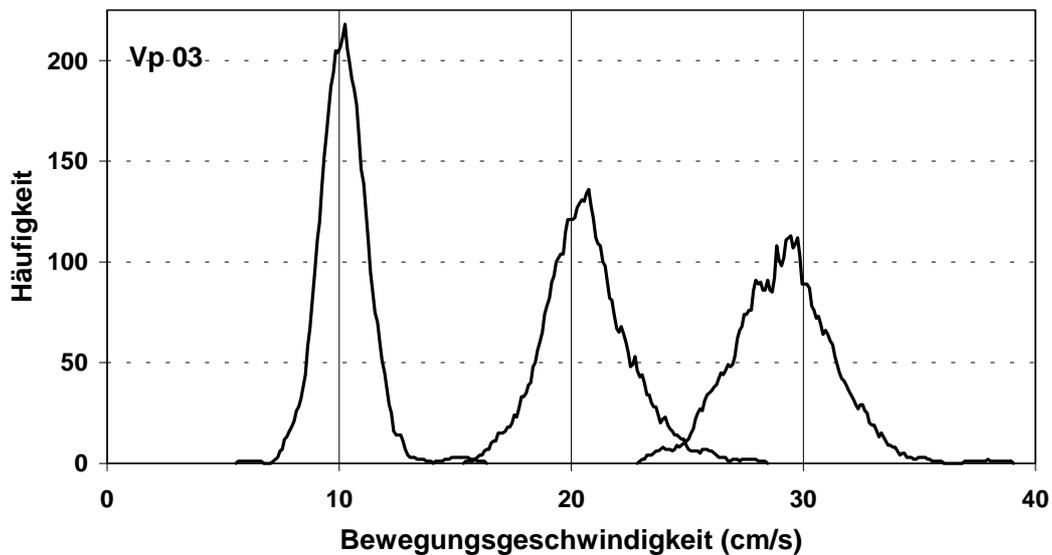
Mit der Methode der gleitenden Mediane (s. 2.11) wurden über die 475 ausgewerteten Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit individuelle Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten erstellt. In Abb. 5-01 sind diese exemplarisch für Vp 3 dargestellt, in Abb. 5-02 sind sie nach Urteilkategorien („schneller“ / „langsamer“) getrennt. In Anhang G finden sich die Abbildungen für alle 12 Vpn.

#### Mediane

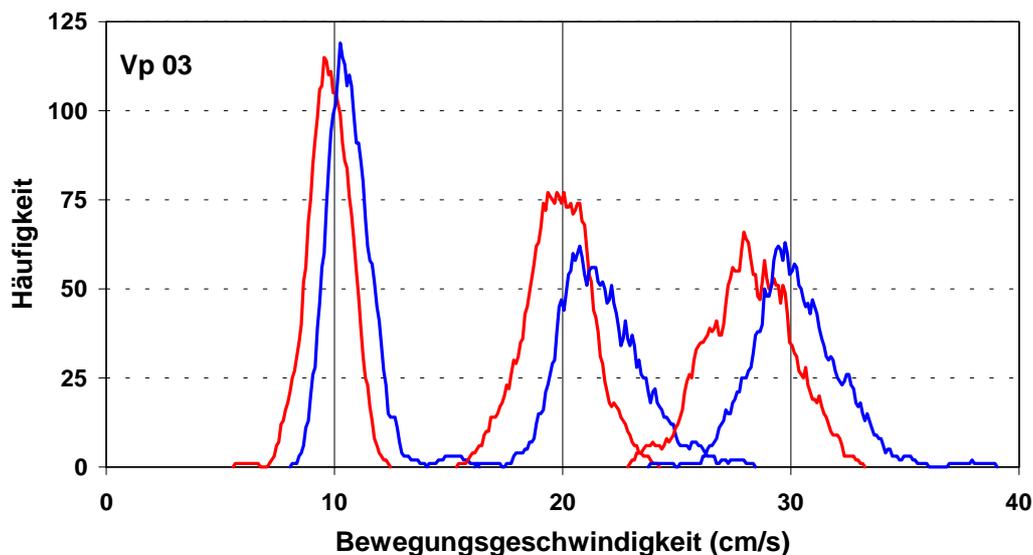
Die Mediane der Häufigkeitsverteilungen der 12 Vpn wichen - vergleichbar mit **Experiment 2** - nur geringfügig von den Zielgeschwindigkeiten ab (Mediane über die 12 Vpn):

Median der Zielgeschwindigkeit 10 cm/s: 10,04 cm/s; Median der Zielgeschwindigkeit 20 cm/s: 19,77 cm/s; Median der Zielgeschwindigkeit 30 cm/s: 29,31 cm/s.

Die Mediane der nach Urteilkategorien getrennten Häufigkeitsverteilungen lagen für alle Vpn für die Urteile „langsamer“ unterhalb und für die Urteile „schneller“ oberhalb der individuellen Mediane der Gesamtverteilung. Dies galt - mit Ausnahmen für die „schneller“-Urteile (Vp 1, Vp 4, Vp 5) - auch in bezug auf die Zielgeschwindigkeiten (Anhang F: Tab. F-04).



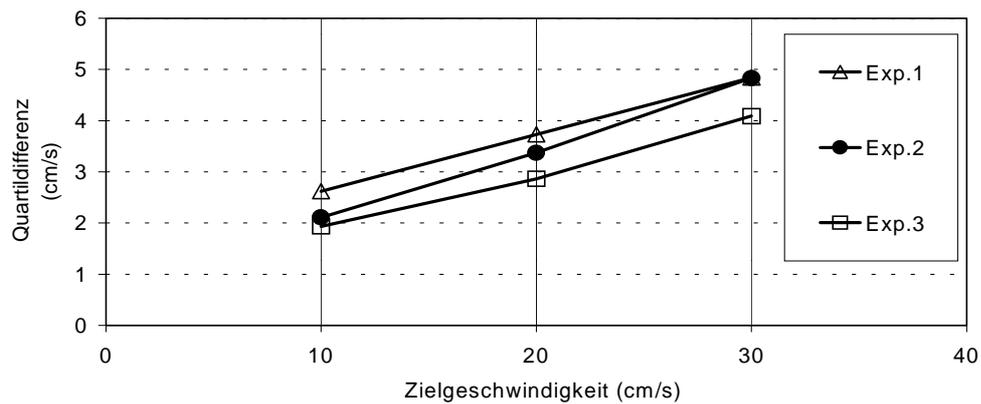
**Abb. 5-01:**  
Vp 3: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten pro Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s) ).



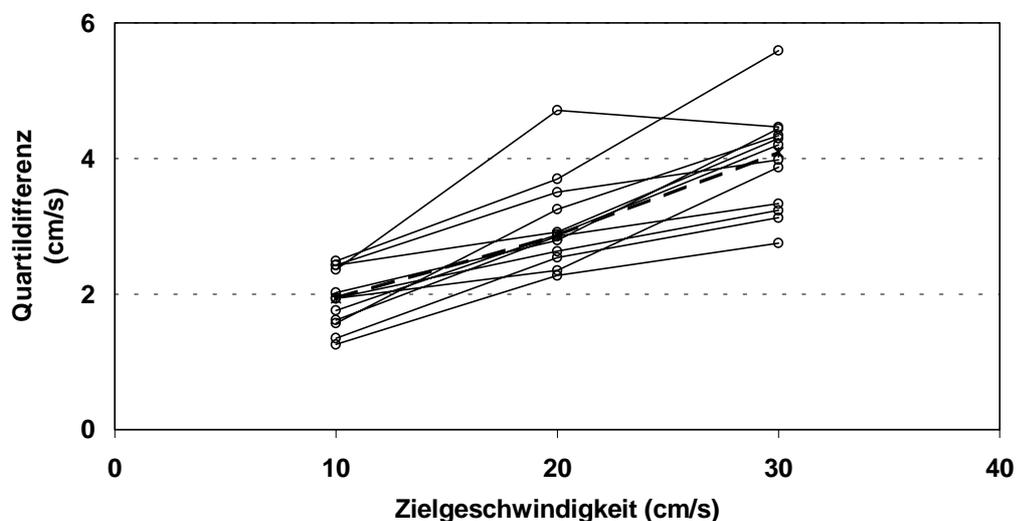
**Abb. 5-02:**  
Vp 3: Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten aus Abb. 5-01, getrennt nach Urteilskategorien ( „langsamer“ (rote Linienzüge) / „schneller“ (blaue Linienzüge) ).

### Quartildifferenzen

Für die individuellen Häufigkeitsverteilungen wurden als Kennwerte der Streuung die Quartildifferenzen (s. 2.11) bestimmt. Die Quartildifferenzen stiegen mit zunehmender Zielgeschwindigkeit von ca. 2 auf 3 und 4 cm/s an (Mediane über die 12 Vpn), d. h. die Hälfte der Bewegungsausführungen lagen bereits  $\pm 10\%$  bis  $15\%$  um die Zielgeschwindigkeiten. Von **Experiment 1** (Anhang A: Tab. A-02) zu **Experiment 2** (Anhang D: Tab. D-04) und **Experiment 3** (Anhang F: Tab. F-05) war eine leichte Abnahme der Quartildifferenzen, d. h. eine zunehmende Annäherung an die Zielgeschwindigkeiten festzustellen (Abb. 5-03, Abb. 5-04).



**Abb. 5-03:**  
Mittlere Quartildifferenzen (zusätzlich eingezeichnet: Quartildifferenzwerte, ermittelt für Experiment 1 und 2).



**Abb. 5-04:**  
Quartildifferenzwerte pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit für die Gesamtverteilungen („langsamer“- und „schneller“-Urteile zusammengefaßt). Gestrichelte Linien: Mediane über die 12 Vpn.

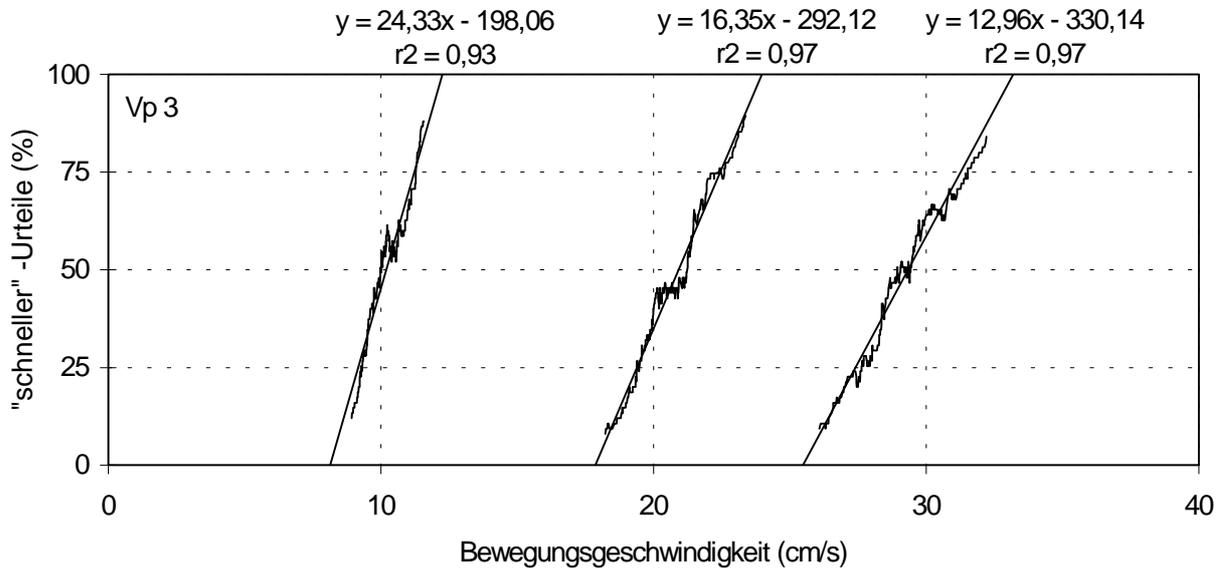
### 5.2.3 Unterschiedsschwellen

Mit der Methode der gleitenden Mediane (s. 2.12) wurden individuelle psychometrische Funktionen des Prozentanteils der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von den Bewegungsgeschwindigkeiten abgebildet (s. Abb. 5-05 exemplarisch für Vp 3, die Abbildungen für alle 12 Vpn befinden sich in Anhang G). Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen über die psychometrischen Funktionen lagen sämtlich über 0,90.

Für alle 12 Vpn waren für jede der drei Zielgeschwindigkeiten Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung des Armes zu bestimmen. Die Unterschiedsschwellen nahmen mit zunehmender Zielgeschwindigkeit von 1,15 cm/s (Median Zielgeschwindigkeit „Langsam“ über die 12 Vpn) auf 2,36 cm/s (Median Zielgeschwindigkeit „Schnell“ über die 12 Vpn) zu (Abb. 5-06, Abb. 5-07, Anhang F: Tab. F-06).

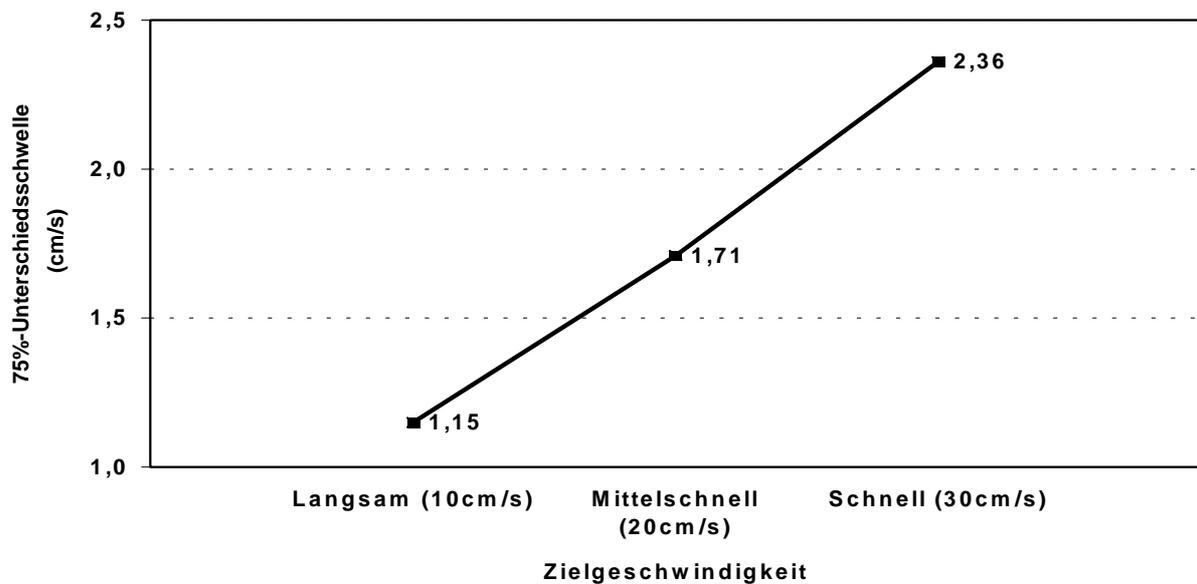
Die Vpn, die unter dem Kriteriumswert für den „doppelten Bonus“ lagen (s. 5.2.5) und von denen angenommen werden kann, daß sie die Instruktion nicht zur Genüge umsetzten, wiesen mitunter die höchsten Unterschiedsschwellen auf. Vp 11, die für die

Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“ und „Schnell“ den doppelten Bonus nicht erreichte, wies für alle drei Zielgeschwindigkeiten die höchsten Unterschiedsschwellen auf.



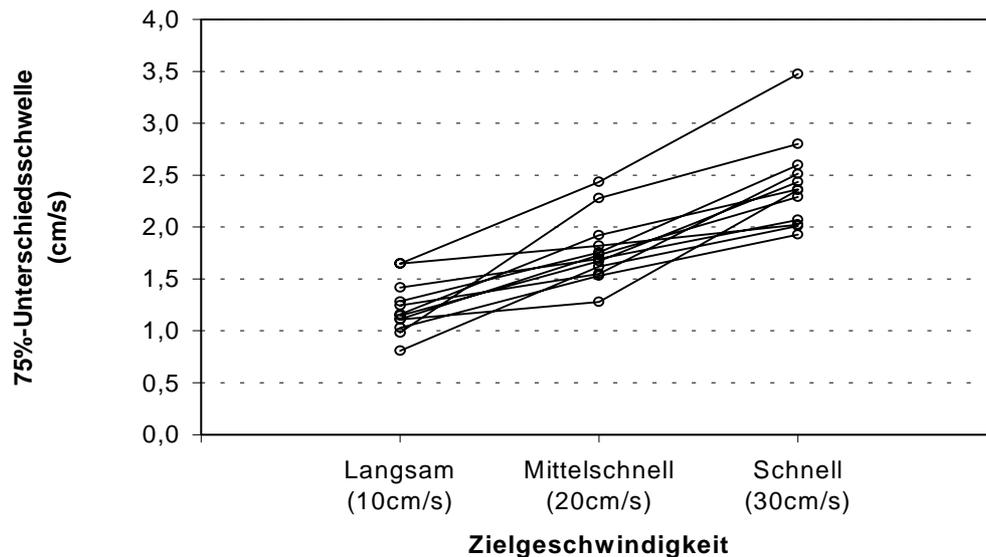
**Abb. 5-05:**

Vp 3: Psychometrische Funktionen (Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit) und deren lineare Regressionen für die drei Zielgeschwindigkeiten („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s) ).



**Abb. 5-06:**

Unterschiedsschwellen (Mediane über die 12 Vpn) pro Zielgeschwindigkeit.

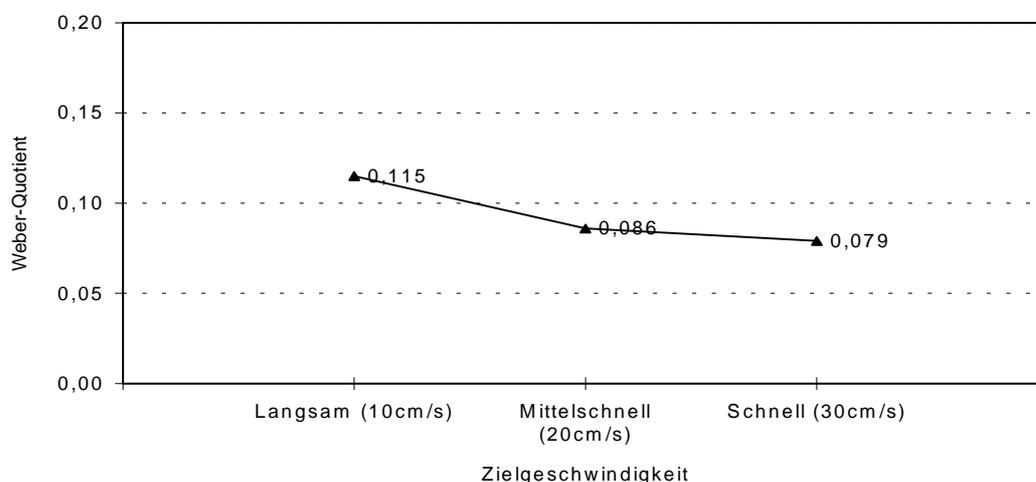


**Abb.: 5-07:**  
Unterschiedsschwellen pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit.

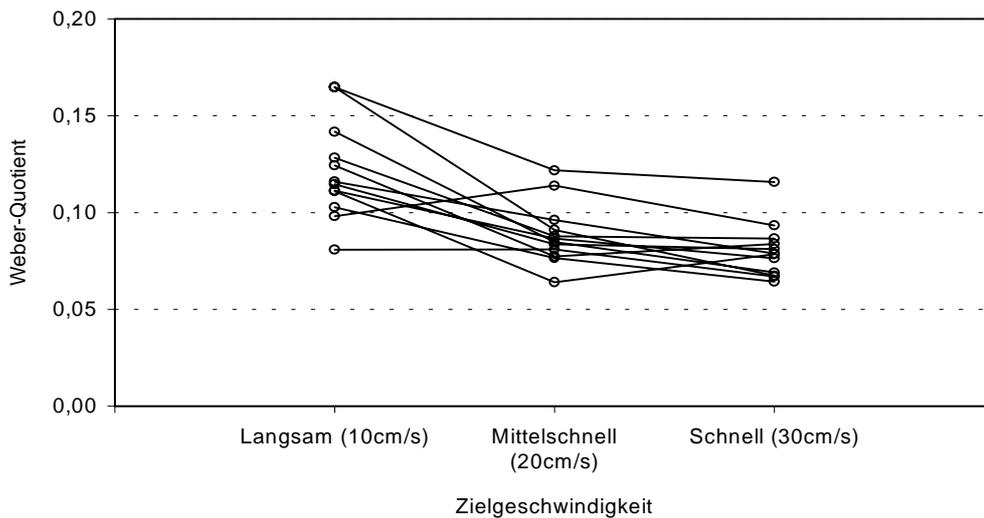
### Unterschiedsschwellen und Weber-Quotienten

Die sog. „Weber-Quotienten“ beschreiben das Verhältnis zwischen Unterschiedsschwelle und dem Vergleichswert. Nach dem Weberschen Verhältnis wird erwartet, daß in dem Maß, in dem der Vergleichswert zunimmt, die Unterschiedsschwelle ansteigt. Dies ist zutreffend, eine strenge lineare Beziehung in dem Sinne, daß die Quotienten eine Konstante darstellen (Webersches Gesetz, Weber 1846), gilt jedoch wenn, dann meist nur für einen begrenzten Wertebereich. Darüber hinaus stellen die Weber-Quotienten jedoch auch ein Vergleichsmaß für die Sensitivität der Sinnessysteme dar. Je niedriger die Quotienten, um so höher die Empfindlichkeit des Sinnessystems.

Die Unterscheidbarkeit der Geschwindigkeit der eigenen, willkürlich ausgeführten „aktiven“ Gliedmaßenbewegungen lag in **Experiment 3** bei ca. 8 bis 12 Prozent von den Zielgeschwindigkeiten in cm/s (Mediane über die 12 Vpn). Individuell lag die Schwankungsbreite der einzelnen Vpn bei einem Weber-Quotienten von 0,064 der „besten“ und 0,165 der „schlechtesten“ Vp, d. h. zwischen 6,4 % und 16,5 %. Die Weber-Quotienten zeigten in Relation zur zunehmenden Zielgeschwindigkeiten eine leichte Zunahme der kinästhetischen Empfindlichkeit an (0,12 für die Zielgeschwin-



**Abb. 5-08:**  
Weber-Quotienten (Mediane über N=12) pro Zielgeschwindigkeit.

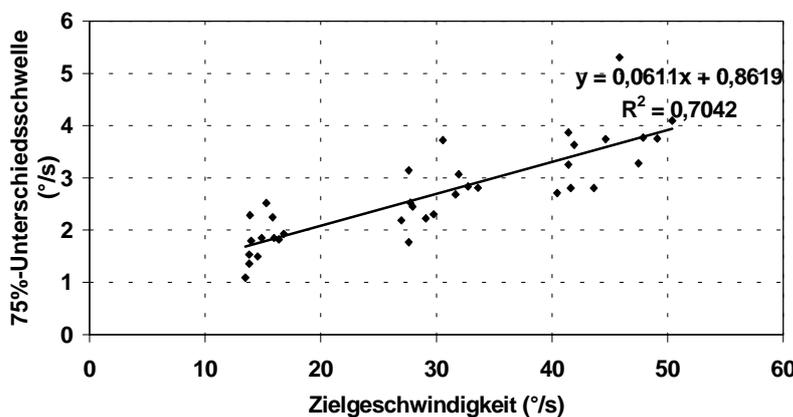


**Abb. 5-09:**  
Weber-Quotienten pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit.

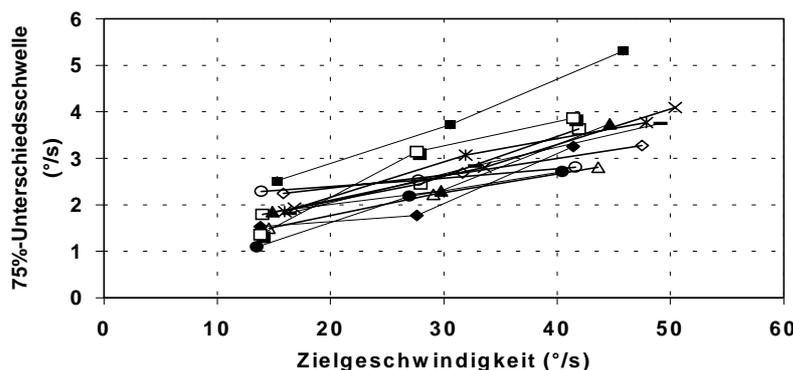
digkeit von 10 cm/s, 0,09 für die Zielgeschwindigkeit von 20 cm/s und 0,08 für die Zielgeschwindigkeit von 30 cm/s, jeweils Mediane über die 12 Vpn). Mit Ausnahme von je einem Wert von Vp 9 und Vp 12 traf dies auch für die einzelnen Vpn zu (Abb. 5-08, Abb. 5-09, Anhang F: Tab. F-07).

Unterschiedsschwellen und Winkelgeschwindigkeit

Die Umrechnung der Unterschiedsschwellenwerte von Zentimeter in Winkelgrad pro Sekunde bewirkte eine Verschiebung der individuellen Verläufe der Unterschiedsschwellen ineinander, wobei die Charakteristik der Abbildung der Unterschiedsschwellen erhalten blieb (Abb. 5-10 und Abb. 5-11, Anhang F: Tab. F-08).



**Abb. 5-10:**  
Anpassung einer linearen Regression an die Unterschiedsschwellen und Zielgeschwindigkeiten in °/s (N=12).



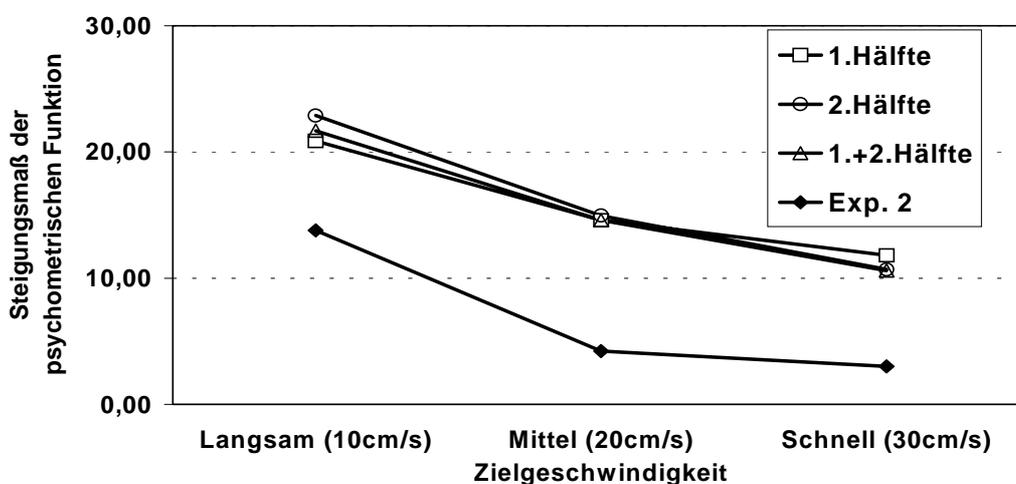
**Abb. 5-11:**  
Beziehung zwischen Unterschiedsschwellen und Zielgeschwindigkeiten pro Vp in °/s (N=12).

### Unterschiedsschwellen und Anzahl der Bewegungsaufnahmen

Um einen möglichen Einfluß der Verdoppelung der Anzahl der Bewegungsaufnahmen zu überprüfen, wurden zusätzlich die psychometrischen Funktionen getrennt für die erste und die zweite Hälfte der 475 Bewegungsaufnahmen erstellt (1. bis 238. und 238. bis 475. Bewegungsaufnahme).

Die Verdoppelung der Anzahl der Bewegungsaufnahmen gegenüber **Experiment 2** hatte insofern einen Einfluß auf das Gelingen der Erhebung von Unterschiedsschwellen, als daß mit jeweils einer Hälfte der Bewegungsaufnahmen nicht mehr für alle Vpn Unterschiedsschwellen zu ermitteln waren. Für die erste Hälfte der Bewegungsaufnahmen waren nur für 22 von den 36 psychometrischen Funktionen (12 Vpn x drei Zielgeschwindigkeiten), für die zweite Hälfte nur für 27 der 36 psychometrischen Funktionen Unterschiedsschwellen zu erheben, da der untere und/oder obere Schwellenwert nicht überschritten wurde. Gegenüber **Experiment 2** war der Anteil an erhobenen Unterschiedsschwellen alleine für die erste bzw. zweite Hälfte der Bewegungsaufnahmen jedoch deutlich gestiegen. Zu berücksichtigen ist ferner, daß die Anzahl von 75 Werten für das Datenfenster zur Berechnung der gleitenden Mediane für 475 Bewegungsaufnahmen optimiert wurde (s. 2.12) und mit einem kleineren Datenfenster – im Gegensatz zu **Experiment 2** – deutlich mehr Unterschiedsschwellen zu erfassen gewesen wären.

Es war keine systematische Veränderung der Steigungsmaße der psychometrischen Funktionen von der ersten zur zweiten Hälfte der Bewegungsaufnahmen gegeben (In der Bedingung „Zielgeschwindigkeit Langsam“ wiesen acht der 12 Vpn eine Erhöhung des Steigungsmaßes auf, in der Bedingung „Mittelschnell“ und „Schnell“ jeweils fünf Vpn). Die Zusammenführung der ersten und zweiten Hälfte der Bewegungsaufnahmen führte bei einzelnen Vpn jedoch zu einem niedrigeren Steigungsmaß als jeweils deren getrennte Auswertung (in der Bedingung „Zielgeschwindigkeit Langsam“ und „Schnell“ fünf der 12 Vpn, in der Bedingung „Mittelschnell“ drei Vpn). Nur zwei Vpn wiesen in jeweils einer Bedingung eine Erhöhung des Steigungsmaßes für die Gesamtauswertung auf (Abb. 5-12, Anhang F: Tab. F-09). Der Vergleich der Steigungsmaße von **Experiment 2** mit denen der ersten oder zweiten Hälfte von **Experiment 3** zeigt zudem eine deutliche Verbesserung der kinästhetischen Unterscheidungsleistung der Vpn in **Experiment 3** an (Abb. 5-12).

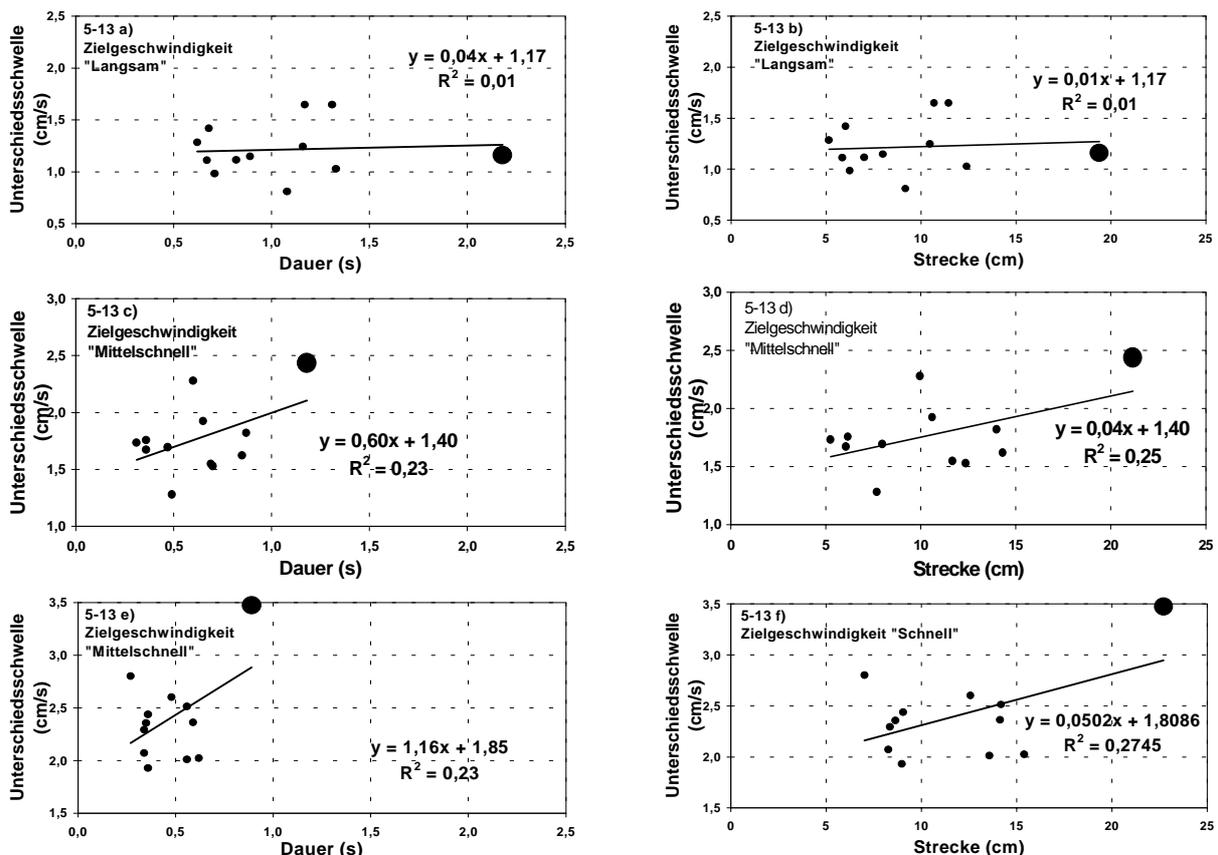


**Abb. 5-12:**

Steigungsmaß der linearen Regression über die psychometrischen Funktionen, getrennt für die erste und zweite Hälfte der Bewegungsaufnahmen sowie über alle 475 Bewegungsaufnahmen (Median über die 12 Vpn pro Zielgeschwindigkeit). Zusätzlich: Medianwerte aus Experiment 2 (N=6).

### Unterschiedsschwellen und Strecke sowie Dauer

Ein Zusammenhang zwischen den Unterschiedsschwellen und der zurückgelegten Strecke bzw. der benötigten Bewegungszeit war nicht gegeben. Die Urteile der Vpn beruhten nicht auf einer Strecken- oder Zeitschätzung der Bewegungsausführungen. In Abb. 5-13 sind die individuellen Unterschiedsschwellen der 12 Vpn gegen die mittlere Dauer und die mittleren Bewegungsstrecken abgetragen. Vereinzelt Ausreißer (Vp 6 für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ und Vp 11 für die Zielgeschwindigkeiten „Mittelschnell“ und „Schnell“) führten zu einem scheinbaren Anstieg der linearen Regression mit zunehmender Zielgeschwindigkeit (die entsprechende Datenpunkte sind Fett markiert). Die Bestimmtheitsmaße waren jedoch so gering, daß kein Zusammenhang zwischen den Unterschiedsschwellen und der Dauer bzw. der Bewegungsstrecke erkennbar war.



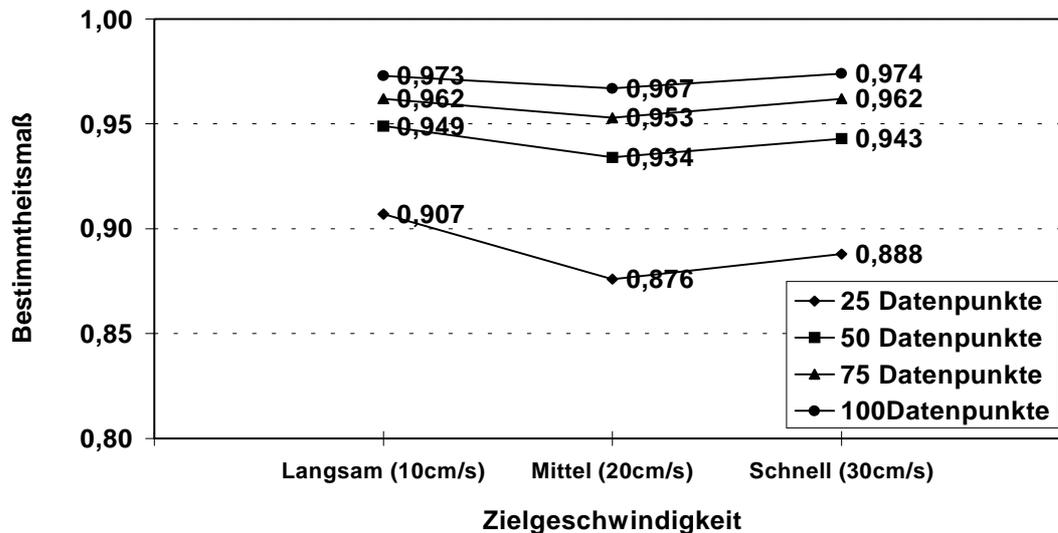
**Abb. 5-13 a) –f):**

Unterschiedsschwellen (cm/s) abgetragen gegen die mittlere Bewegungsdauer (a bis c) bzw. mittlere Bewegungsstrecke (d bis f). Median über 475 Bewegungsaufnahmen pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit: a) und d) „Langsam“ (10 cm/s), b) und e) „Mittelschnell“ (20 cm/s); c) und f) „Schnell“ (30 cm/s). Fett markiert: Erläuterung s. Text.

### Unterschiedsschwellen und gleitende Mediane

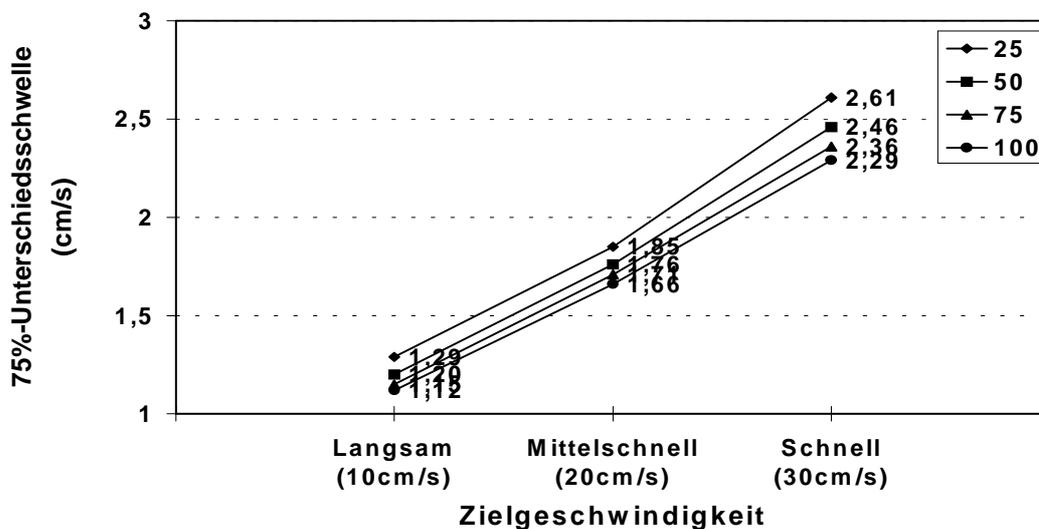
Die psychometrischen Funktionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen wurden mit der Methode gleitender Mediane berechnet. Die optimale Fensterweite von 75 Datenpunkten wurde mit den Daten aus **Experiment 3** bestimmt (s. 2.12). Mit 75 Datenpunkten wurde die Bedingung erfüllt, daß pro Vp und Zielgeschwindigkeit

- die linearen Regressionen über die psychometrischen Funktionen ein Bestimmtheitsmaß von mindesten  $r^2 = 0,90$  aufwiesen (Abb. 5-14) und
- die psychometrischen Funktionen den unteren und oberen Schwellenwert überschritten (Anhang G: Abb. G-01c) bis G-12c).

**Abb. 5-14:**

Bestimmtheitsmaße der Anpassung der linearen Regression an die psychometrische Funktion (Median N=12) in Abhängigkeit von der Anzahl der Datenpunkte für den gleitenden Median.

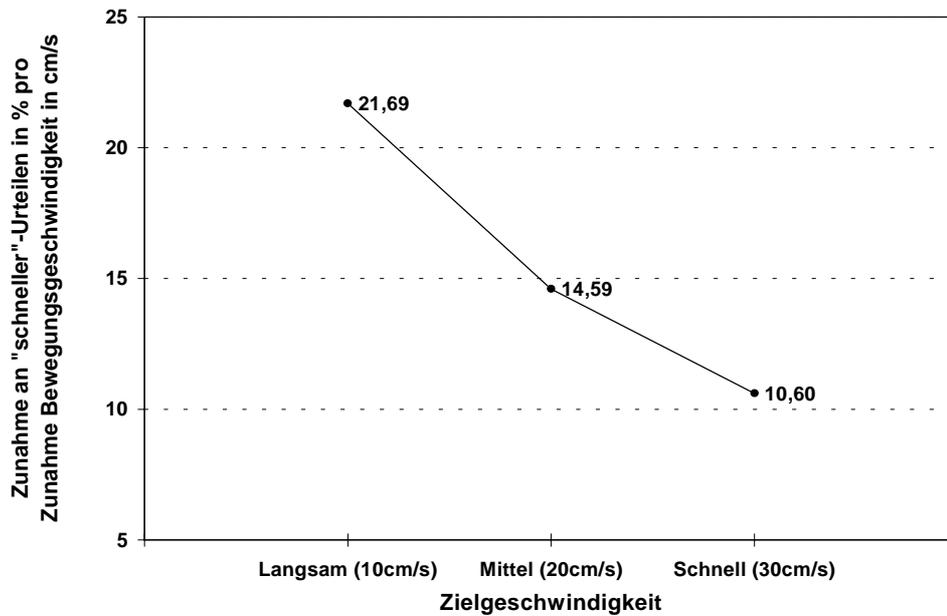
Mit der Weite des Datenfensters für den gleitenden Median wurde auch der Wert der ermittelten Unterschiedsschwelle beeinflusst. Je größer das Datenfenster, um so niedriger die Unterschiedsschwelle (Abb. 5-15).

**Abb. 5-15:**

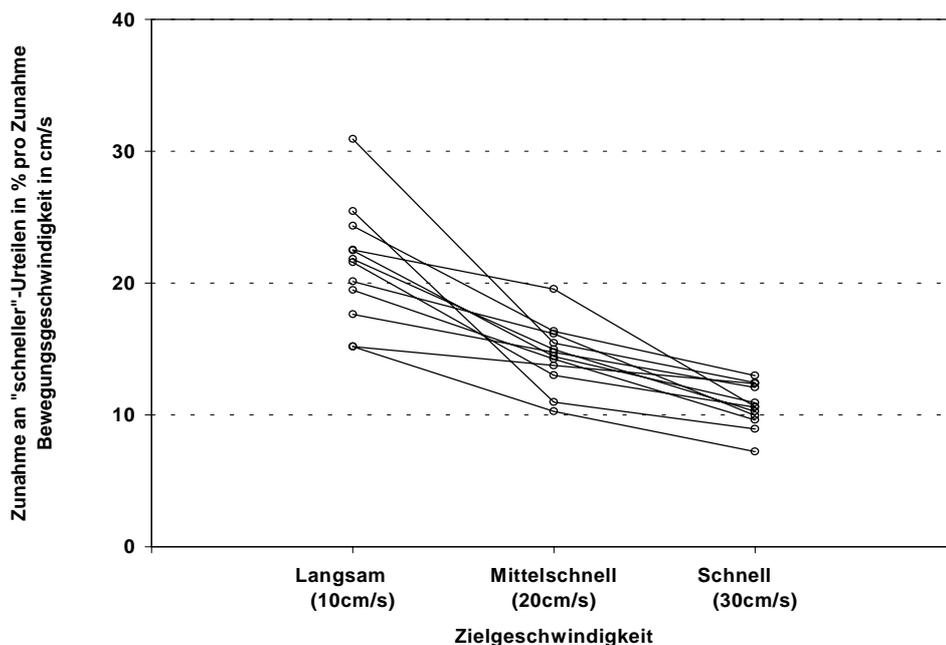
75 %-Unterschiedsschwellen (Median N=12) in Abhängigkeit von der Anzahl der Datenpunkte für den gleitenden Median.

### 5.2.4 Steigungen der psychometrischen Funktionen

Die Steigungsmaße der linearen Regressionen über die psychometrischen Funktionen zeigten für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ (10 cm/s) eine 22-prozentige Zunahme an „schneller“-Urteilen pro Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s (Median über die 12Vpn, Abb. 5-16, Abb. 5-17, Anhang F: Tab. F-09). Der Wert nahm für alle Vpn mit zunehmender Zielgeschwindigkeit ab (Median über die 12 Vpn: 15 % für Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“ und 11 % für Zielgeschwindigkeit „Schnell“).

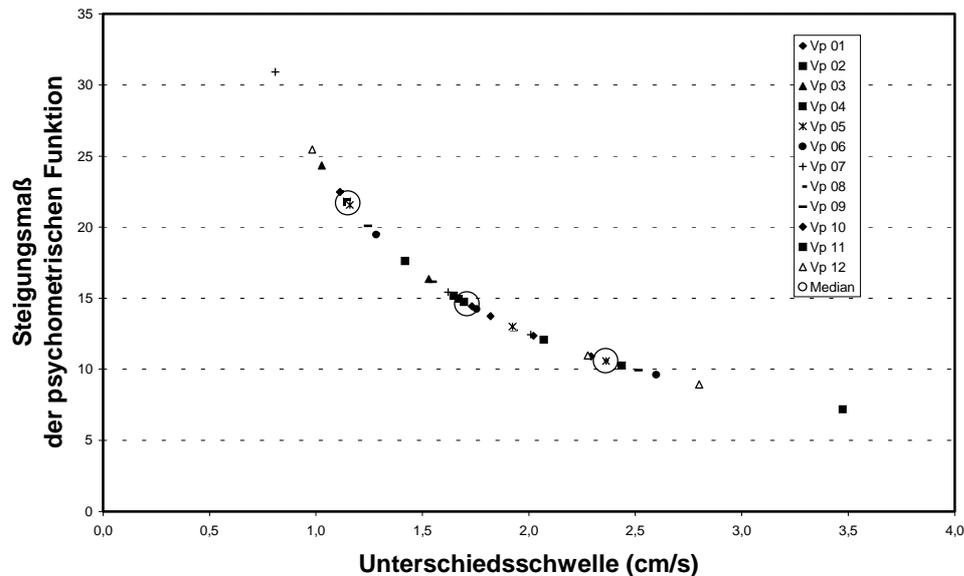


**Abb. 5-16:** Steigungsmaß der linearen Regression (Mediane der 12 Vpn pro Zielgeschwindigkeit) über die psychometrischen Funktionen (Prozentuale Zunahme der „schneller“-Urteile pro Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s).



**Abb. 5-17:** Steigungsmaß der linearen Regression pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit über die psychometrischen Funktionen (prozentuale Zunahme der „schneller“-Urteile pro Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s).

Wie zu erwarten, besteht für alle Zielgeschwindigkeiten ein direkter Zusammenhang zwischen den Steigungsmaßen der psychometrischen Funktionen und den Unterschiedsschwellen, aus dem keine Vp ausscheidet (Abb. 5-18). Das bedeutet, daß die Steigungsmaße in diesem Experiment die Unterschiedsschwellenwerte adäquat repräsentieren. Auch in dem Fall, daß eine psychometrische Funktion den unteren oder oberen Schwellenwert nicht erreichen würde und keine Unterschiedsschwelle erhoben werden könnte, stellt diese Steigung ein adäquates Maß für die Sensitivität in der Geschwindigkeitswahrnehmung in dem produzierten Geschwindigkeitsbereich dar.



**Abb. 5-18:**  
Zusammenhang zwischen Steigungsmaßen der psychometrischen Funktionen und den Unterschiedsschwellen.

### 5.2.5 Verlauf der Bewegungsaufnahmen

#### Geschwindigkeitsverlauf

Zur Beschreibung einer möglichen systematischen Veränderung der Bewegungsgeschwindigkeiten über die 475 in die Auswertung eingegangenen Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit wurden deren lineare Regressionen über den Verlauf der Bewegungsaufnahmen berechnet.

Über die gesamte Durchführung hinweg wurde eine konstante efferente Leistung erbracht. Es waren keine Adaptationseffekte oder Ermüdungserscheinungen festzustellen. Es war bei keiner Vp eine systematische Ab- oder Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit zu verzeichnen. Die individuellen Steigungsmaße der linearen Regression lagen zwischen  $-0,003$  und  $+0,005$  cm/s (Anhang F: Tab. F-10).

Die Mediane der Ordinatenschnittpunkte lagen leicht unter den Zielgeschwindigkeiten und wichen maximal weniger als  $0,7$  cm/s von den Zielgeschwindigkeiten ab (Mediane über die 12 Vpn). Die mit Abstand größte individuelle Abweichung (Vp 12) betrug  $1,7$  cm/s für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“.

Die Bestimmtheitsmaße zeigten keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Abfolge der Bewegungsaufnahmen an. Die Mediane über die 12 Vpn lagen zwischen  $r^2 = 0,007$  und  $r^2 = 0,009$ . Das höchste individuelle Bestimmtheitsmaß lag bei  $r^2 = 0,075$  (Vp 11, Zielgeschwindigkeit „Schnell“).

Es waren keine wesentlichen Veränderungen gegenüber den Ergebnissen von **Experiment 1** und **Experiment 2** festzustellen.

#### Verlauf Strecke und Dauer

Zur Beschreibung einer möglichen systematischen Veränderung der Dauer und der Strecken der 475 in die Auswertung eingegangenen Bewegungen pro Vp und Zielgeschwindigkeit wurden deren lineare Regression über den Verlauf der Bewegungsaufnahmen berechnet. Für die Bewegungsdauer war keine nennenswerte Ab- oder

Zunahme der Bewegungsdauer über die 475 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit zu verzeichnen:

Die Steigungsmaße der linearen Regressionen lagen zwischen 0,000 und -0,001 Sekunden pro Bewegungsaufnahme für die drei Zielgeschwindigkeiten. Die individuellen Steigungsmaße lagen zwischen -0,002 und +0,003 Sekunden pro Bewegungsaufnahme (Mediane über die 12 Vpn, Anhang F: Tab. F-11).

Für die Bewegungsstrecke war eine leichte Tendenz zu kürzeren Bewegungsstrecken über die 475 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit zu verzeichnen: Die Steigungsmaße der linearen Regressionen lagen zwischen -0,005 cm und -0,007 cm pro Bewegungsaufnahme für die drei Zielgeschwindigkeiten (Mediane über die 12 Vpn). Die individuellen Steigungsmaße der linearen Regressionen lagen zwischen -0,023 cm und +0,022 cm pro Bewegungsaufnahme (Anhang F: Tab. F-12). Die Abnahme der Bewegungsdauer mit zunehmender Zielgeschwindigkeit war bei allen 12 Vpn zu beobachten und entsprach der Erwartung, sich mit zunehmender Zielgeschwindigkeit schneller zu bewegen (Anhang F: Tab. F-11).

Für die Bewegungsstrecken lag keine systematische Veränderung der Ordinaten-schnittpunkte der linearen Regression mit der Zielgeschwindigkeit vor, die Bestimmtheitsmaße zeigten sowohl zwischen der Bewegungsdauer als auch der Bewegungsstrecke und der Abfolge der Bewegungsaufnahmen keinen nennenswerten Zusammenhang an (Mediane über die 12 Vpn, Anhang F: Tab. F-10).

### **5.2.5 Schwankungsbreite von Strecke und Dauer**

Es gab keinen Hinweis darauf, daß die Vpn versuchten, die Dauer und/oder die Strecke der Bewegungen konstant zu halten, um sich bei der Beurteilung der Bewegungsgeschwindigkeit an der Bewegungsdauer oder Strecke zu orientieren. Die Dauer und Strecke der einzelnen Bewegungen variierten für jede Vp als auch zwischen den 12 Vpn erheblich.

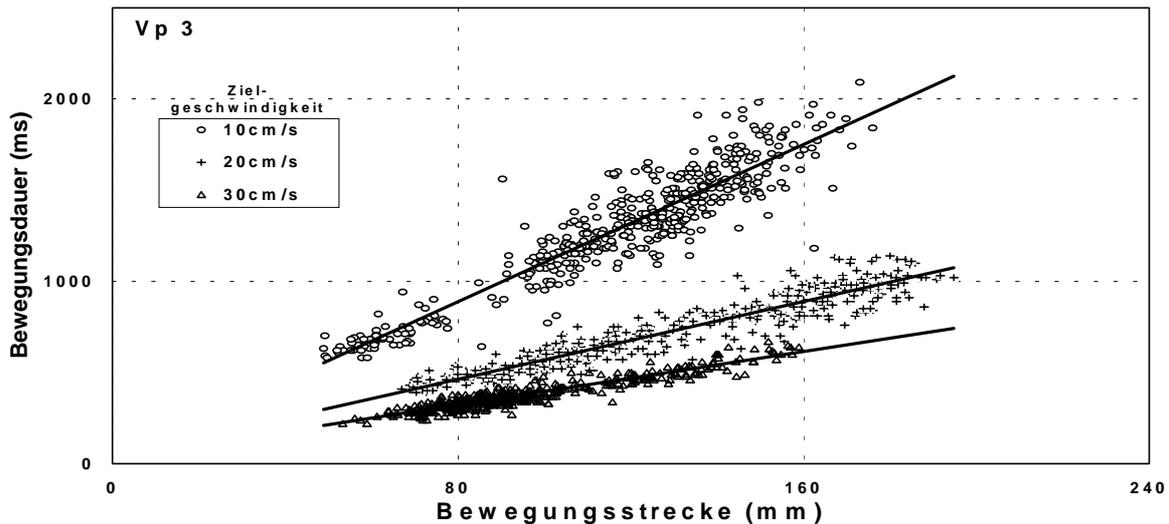
In Abb. 5-19 ist exemplarisch für Vp 3 für jede der 475 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit die Bewegungsdauer gegen die Bewegungsstrecke abgetragen (In Anhang H finden sich die Abbildungen für alle 12 Vpn).

#### Mittlere Bewegungsstrecke

Eine leichte Abnahme der Bewegungsstrecke ist für die Zielgeschwindigkeit „Schnell“ gegeben (Median über die 12 Vpn). Es war jedoch keine systematische Zu- oder Abnahme der Bewegungsstrecke mit der Zielgeschwindigkeit nachzuweisen, die Vpn unterschieden sich in Zu- und Abnahme der mittleren Bewegungsstrecken zwischen den Zielgeschwindigkeiten. Demgegenüber war für fünf der 12 Vpn eine Zunahme der Bewegungsstrecke von der Zielgeschwindigkeit „Langsam“ zur Zielgeschwindigkeit „Schnell“ hin gegeben, bei keiner Vpn eine systematische Abnahme.

#### Mittlere Bewegungsdauer

Für die mittlere Bewegungsdauer war einhergehend mit der zunehmenden Zielgeschwindigkeit mit wenigen Ausnahmen (Vp 1, Vp 5 und Vp 7) eine systematische Abnahme der Bewegungsdauer zu verzeichnen (Anhang F: Tab. F-13).

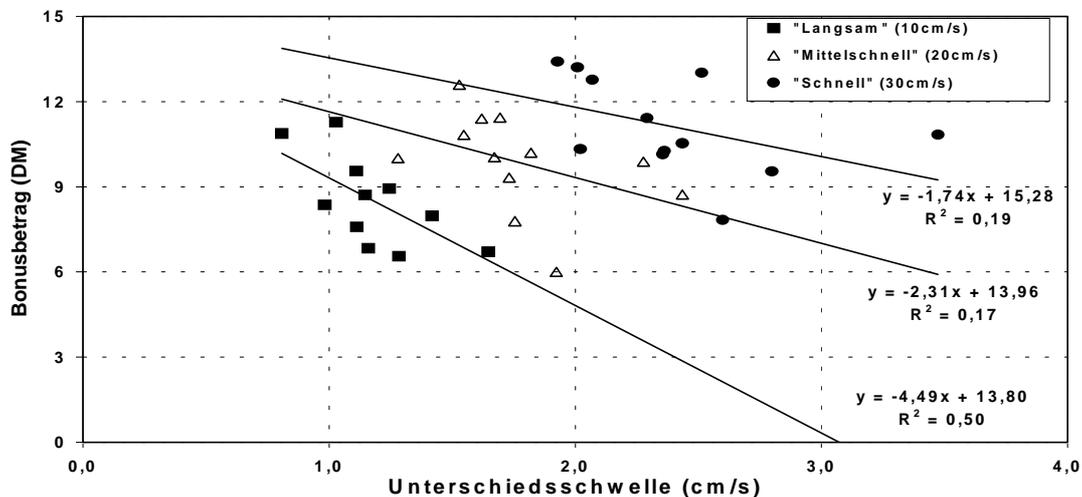


**Abb. 5-19:**

Vp 3: Bewegungsdauer (ms) abgetragen gegen Bewegungstrecke (mm) für die 475 Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit.

### 5.2.6 Monetäre Verstärkung: Bonusbeträge

Die Vpn erzielten für alle drei Sitzungen zusammen einen mittleren Auszahlungsbetrag von 56,11 DM (Median über alle 12 Vpn, Tab. F-15 b). Der erzielte Bonusbetrag nahm mit abnehmender Unterschiedsschwelle zu. Der Zusammenhang zwischen Bonusbetrag und Unterschiedsschwelle war jedoch, gemessen an dem Bestimmtheitsmaß der linearen Regression pro Zielgeschwindigkeit, gering (Abb. 5-20).



**Abb. 5-20:**

Zusammenhang zwischen Bonusbetrag und Unterschiedsschwelle pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit (ohne Berücksichtigung des „doppelten Bonus“).

### 5.2.7 Befragung der Versuchspersonen

Alle Versuchspersonen gaben an, daß ihnen die Versuchsdurchführung „Spaß“ bereitet habe. Die Versuchsdurchführung war im Gegensatz zu den vorangegangenen Experimenten oft von Flüchen und Jubelrufen begleitet. Diese traten insbesondere beim Verlust und Gewinn des „doppelten Bonus“ oder z. B. bei Erreichen eines „runden“ Auszahlungsbetrages auf.

### Kinästhetische Leistung und monetäre Verstärkung

Als entscheidenden Anreiz für ihre Leistungsbereitschaft gaben die meisten Vpn das Erreichen und Halten des „doppelten Bonus“ an. Die Vpn, die von sich selber angaben, daß sie „schlechte Verlierer“ seien und ihr Ziel bei der Versuchsdurchführung gewesen sei, einen möglichst hohen Betrag zu erwirtschaften und auf jeden Fall den „doppelten Bonus“ zu erreichen (Vp 1, Vp 4, Vp 5, Vp 6), erzielten sowohl die höchsten Auszahlungsbeträge (Anhang F: Tab. F-14) als auch die niedrigsten Unterschiedsschwellen (Anhang F: Tab. F-06).

Vp 6 schilderte z. B. ihre zunehmende Anspannung, als sie den „doppelten Bonus“ zu Ende der Versuchsdurchführung zu verlieren drohte. Auf die Frage, was sie „gemacht“ habe, um den doppelten Bonus beizubehalten, gab sie an, „ich habe mich einfach angestrengt“. Eine besondere Strategie wurde auf Nachfrage verneint.

Vp 11 gab als einzige Vp an, daß sie der Auszahlungsbetrag und der „doppelte Bonus“ nicht sonderlich interessiert habe. Für Vp 11 waren zwar Unterschiedsschwellen zu ermitteln, die eine weit bessere kinästhetische Leistung gegenüber den Vpn der vorangegangenen Experimente bedeuteten, sie wies aber mit Abstand die schlechteste kinästhetische Leistung der 12 Vpn in **Experiment 3** auf (Anhang F: Tab. F-06).

Trotzdem erreichten auch einzelne Vpn mit einem niedrigen Auszahlungsbetrag aufgrund des Verlusts des „doppelten Bonus“ eine niedrige Unterschiedsschwelle (Vp 6 für die Zielgeschwindigkeit „Langsam“ und Vp 11 für die Zielgeschwindigkeit „Mittelschnell“).

### „Doppelter Bonus“

Alle Vpn vermuteten, daß der „doppelte Bonus“ den Anteil an richtigen Urteilen berücksichtigte, aber darüber hinaus noch weitere Faktoren einfließen, da auch mit einer Serie von richtigen Urteilen der Füllungsgrad der Balkengraphik mitunter im Sinken begriffen war. Keine der Vpn konnte jedoch angeben, was den Füllungsgrad der Balkenanzeige des „doppelten Bonus“ beeinflusste. Eine der häufigsten Fragen, die gestellt wurde, war die Frage nach den Kriterien für den doppelten Bonus.

### Beurteilung „efferente“ versus „afferente“ Aufgabe

Wie in den beiden vorangegangenen Experimenten wurde von allen Vpn die „efferente Aufgabe“, der Zielgeschwindigkeit möglichst nahe zu kommen, als einfacher als die „afferente Aufgabe“, die Bewegungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Zielgeschwindigkeit zu beurteilen, beurteilt. Die Durchführung von 500 Bewegungsaufnahmen wurde nicht als „belastend“ eingestuft.

### Beurteilung der Zielgeschwindigkeiten

Im Anschluß an das Experiment wurde jede Vp gebeten, die Zielgeschwindigkeiten in eine Rangreihe des empfundenen Schwierigkeitsgrades in der Durchführung des Experiments zu ordnen (Anhang F: Tab. F-15). Im Median über die 12 Vpn war ein leichter Trend dahingehend festzustellen, daß von den Vpn die Bedingung „langsam“ (Zielgeschwindigkeit 10 cm/s) als am schwierigsten und die Bedingung „schnell“ (Zielgeschwindigkeit 30 cm/s) als am einfachsten beurteilt wurde. Die Bewertungen der Vpn waren aber sehr uneinheitlich, wobei nicht nur auf- oder absteigende Reihenfolgen des empfundenen Schwierigkeitsgrades mit Zunahme der Zielgeschwindigkeit gewählt wurden.

### Beurteilung Geschwindigkeitswahrnehmung

Die Vpn wurden im Anschluß an das Experiment befragt, worauf sie ihr Geschwindigkeitsurteil gestützt hätten. Die meisten Vpn gaben „auf die Geschwindigkeit“ als Antwort. Gezielte Nachfragen, wie sie die Geschwindigkeit wahrgenommen haben und ob es bestimmte Hinweisreize und Empfindungen gegeben habe, die sie für die Geschwindigkeitswahrnehmung herangezogen hätten, wurden verneint. Nur Vp 3 gab an, auf „die Muskelspannung“ geachtet zu haben. Alle Vpn gaben an, daß sie die Geschwindigkeit der Bewegung als solche bewußt wahrgenommen hätten.

## 5.3 Diskussion

Mit der Erweiterung der Bonus-Regelung und damit der zusätzlichen Kontrolle der Gesamtleistung war der entscheidende Durchbruch gelungen. Bestätigt wurde die Bewertung, daß in **Experiment 1** und **Experiment 2** eine Unterschätzung des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens der Geschwindigkeit der eigenen Armbewegungen stattgefunden hatte.

Die Einführung des „doppelten Bonus“ führte nicht nur zu einer Verstärkung des Charakters der Versuchsdurchführung als „Geschicklichkeitsspiel“ und zu einer erheblich gesteigerten „Spielfreude“ der Vpn, sondern damit entscheidend verbunden: Einer erheblichen Steigerung der kinästhetischen Leistung im Vergleich zu den vorangegangenen Experimenten.

Für alle 12 Vpn konnten mit den vorgegebenen Kriterien psychometrische Funktionen erstellt und Unterschiedsschwellen erhoben werden. Selbst die Unterschiedsschwellen der „schlechtesten“ Vp lagen weit unter denen der „besten“ Vp aus **Experiment 2**. Der Vergleich mit den Steigungsmaßen der psychometrischen Funktionen als Maß der kinästhetischen Sensitivität zeigte insgesamt eine erhebliche Leistungssteigerung von **Experiment 2** zu **Experiment 3** an (Abb. 5-12).

Die Verdoppelung der Anzahl der Bewegungsaufnahmen pro Zielgeschwindigkeit von 250 in **Experiment 2** auf 500 in **Experiment 3** war nur insofern am Erfolg beteiligt, als daß mit der Anzahl von 75 Datenpunkten für das Datenfenster des gleitenden Medians für alle 12 Vpn und Zielgeschwindigkeiten psychometrische Funktionen vorlagen, die den unteren 25 %- und den oberen 75 %-Schwellenwert überschritten. Für die Verbesserung der kinästhetischen Leistung war die Verdoppelung jedoch nicht entscheidend, wie die getrennte Auswertung der ersten und der zweiten Hälfte der 475 Bewegungsaufnahmen zeigte.

Die Ergebnisse aus **Experiment 3** werden im folgenden Kapitel, in dem ein Fazit aus den Ergebnissen der drei Experimente gezogen wird, ausführlicher besprochen.

## **6. Fazit**

## **6.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse**

**Die wesentlichen Ergebnisse aus den vorgestellten Experimenten sind:**

- 1.) Mit einer neuartigen psychophysischen Methode wurden erstmalig Unterschiedsschwellen für die kinästhetische Wahrnehmung der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen erhoben.

Sie betragen 1,15 cm/s für die Zielgeschwindigkeit von 10 cm/s (Weber-Quotient: 0,12), 1,71 cm/s für die Zielgeschwindigkeit von 20 cm/s (Weber-Quotient: 0,09) und 2,36 für die Zielgeschwindigkeit von 30 cm/s (Weber-Quotient: 0,08) (jeweils Medianwerte für die 12 Versuchspersonen aus **Experiment 3.**)

Solche Unterschiedsschwellen sind bislang nicht bekannt, die kinästhetische Wahrnehmungsfähigkeit der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen wurde nicht beachtet oder weit unterschätzt (s. 1.1).

- 2.) Mit dieser Methode war es möglich, mit eigeninitiierten „aktiven“ statt „passiv geführten“ Gliedmaßenbewegungen des Armes solche kinästhetischen Unterschiedsschwellen zu bestimmen. Die Versuchsperson diente gleichsam als „Stimulusgenerator“ und als „Beurteiler“.

Die Untersuchung von „aktiven“ statt „passiven“ Bewegungen zur Erfassung kinästhetischer Leistungen ist zum einen aufgrund der Koppelung der Aktivität der  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Muskelspindeln erforderlich. Klassische psychophysische Verfahren sind jedoch nur mit passiven Bewegungen anwendbar (s. 1.4).

Zum anderen ist bekannt, daß kinästhetische Informationen aufgrund von „aktiven“ und „passiven“ Gliedmaßenbewegungen zentralnervös in unterschiedlichen Hirngebieten verarbeitet werden und zu unterschiedlichen Hirnaktivitäten führen. Die Wahrnehmung von „aktiven“ und „passiven“ Bewegungen stellen folglich zwei unterschiedliche kinästhetische Wahrnehmungsqualitäten dar (s. 1.4).

- 3.) Die Konsequenz des Wahrnehmungsurteils, hier durch ein System monetärer Verstärkung bzw. Belohnung bedingt, stellt eine wesentliche kognitive Einflußgröße auf die kinästhetische Leistung von Versuchspersonen dar. Die „efferente“ Leistung, d. h. die Annäherung an die Zielgeschwindigkeit und die „afferente“ Leistung, d. h. das Fällen von richtigen Urteilen, wurde mit der monetären Verstärkung nicht nur gesteuert, sondern auch maßgeblich gesteigert.

## **6.2 Diskussion der Ergebnisse**

### „Kinästhesie“ beinhaltet „Wahrnehmung“

Vorgestellt wurde eine neuartige psychophysische Methode, mit der Unterschiedsschwellen in der kinästhetischen Geschwindigkeitswahrnehmung der eigenen und willkürlich ausgeführten Gliedmaßenbewegungen erfaßt wurden. Neu sind aber vor allem die Unterschiedsschwellen an sich: bislang ist keine Arbeit bekannt, in der diese bestimmt wurden.

Dies scheint auf den ersten Blick überraschend, aber die kinästhetische Wahrnehmbarkeit der Bewegungen der eigenen Gliedmaßen und deren Geschwindigkeit wurde in der Geschichte der Psychophysik bis heute kaum beachtet und wenn, dann vielfach unterschätzt oder gar in Frage gestellt. Noch in einer der neueren Untersuchungen zur Fähigkeit, Linien mit und ohne visuelle Rückmeldung nachzuzeichnen,

schrieben Fourneret & Jeannerod (1998) „*These results suggest that normal subjects are not aware of signals generated by their own movements.*“.

In diesem Zusammenhang wird auch die Kenntnis des kinästhetischen Beitrags der Muskelspindelrezeptoren oftmals immer noch nicht beachtet und deren Aufgabe alleine im Dienste eines reflexartigen Rückkoppelungsmechanismus zur Erfolgskontrolle einer Bewegungsausführung gesehen (einen historischen Überblick bieten McCloskey, 1978; Goodwin et al., 1972b; Clark & Horch, 1986).

Demgegenüber stehen zahlreiche neurophysiologische Befunde sowohl über die zentralnervöse Verarbeitung der durch die Muskelspindelrezeptoren vermittelten Bewegungsinformationen von Gliedmaßen (Woolsey et al., 1947; Oscarsson & Rosén, 1963; Albe-Fessard & Liebeskind, 1966; Landgren et al., 1967; Phillips et al., 1971; Schwartz et al., 1973; Lucier et al., 1975; Hore et al., 1976; McCloskey, 1978; Fetz et al., 1980; Gardner & Costanzo, 1981; Burgess et al., 1982; Wiesendanger & Miles, 1982; Jones & Friedman, 1982; Chapman et al., 1984; Clark & Horch, 1986, 1987; Kaas & Pons, 1988; Ohye et al., 1989; Lenz et al., 1990, 1994; Bauswein et al., 1991) als auch Befunde über illusionäre Bewegungswahrnehmungen, die durch selektive Stimulation der primären Muskelspindelrezeptoren ausgelöst werden (Goodwin et al., 1972a; McCloskey, 1973, 1987; Matthews & Simmonds, 1974; Lackner, 1975; Craske, 1977; Roll & Vedel, 1982; McCloskey et al., 1983; Sittig et al., 1985). Phänomenologisch und neurophysiologisch gilt hiermit ein vom Stellungssinn unabhängiger kinästhetischer Bewegungssinn als gesichert.

Der Konflikt, bzw. Widerspruch zwischen der Bedeutungsgebung des Wortes „Kinästhesie“ („kinein“ für „Bewegung“ und „aisthesis“ für „Wahrnehmung“) und dem in Frage gestellten kinästhetischen Wahrnehmungsvermögen schlägt sich von der Fachliteratur bis in das „Deutsche Universalwörterbuch Duden“ (Duden, 1996, 1999) nieder, in dem „*Kinästhesie*“ als „*Bewegungswahrnehmung*“ übersetzt, aber widersprüchlich als die „*Fähigkeit, Bewegungen der Körperteile unbewußt zu kontrollieren u. zu steuern*“ definiert wird. Unabhängig von dem, was unter „bewußt“ verstanden werden will, wird in dieser Definition die im Wort „Kinästhesie“ enthaltene und vorab zitierte Wahrnehmungsfähigkeit gleichsam als „unbewußt“ wieder ausgeschlossen (im „Deutschen Wörterbuch Wahrig“ (Wahrig, 1997) wird „*Kinästhesie*“ zutreffender als „*Bewegungsgefühl, Bewegungsempfindung, Empfindung für Muskeln, Sehnen u. Gelenke*“ definiert). Gleichwohl ist davon auszugehen, daß afferente und efferente neuronale Bewegungsinformationen existieren, die als solche nicht wahrgenommen werden oder einen nicht unmittelbar wahrzunehmenden, jedoch regulierenden Einfluß auf die Bewegungsausführung und deren Wahrnehmung besitzen. Eine Beteiligung efferenter Signale an der Wahrnehmung im Sinne eines „Innervationssinnes“ (Helmholtz, 1867), eines „corollary discharge“ (Sperry, 1950), einer „Efferenzkopie“ (von Holst, 1954), oder einer andersgearteten Informationsverarbeitung der Bewegungsintention begründen sogar zusätzlich die Notwendigkeit der Untersuchung aktiver statt passiver Bewegungen bei der Erfassung der kinästhetischen Wahrnehmungsleistung.

Die hier bestimmte Unterscheidbarkeit der Geschwindigkeit der eigenen, willkürlich ausgeführten „aktiven“ Gliedmaßenbewegungen liegt im Mittel bei ca. 8-12 Prozent der Vergleichsgeschwindigkeiten in cm/s. Es ist zu erwarten, daß sich auch die hier bestimmten kinästhetischen Unterschiedsschwellen für die Geschwindigkeit durch weitere methodische Verbesserungen zusätzlich erniedrigen lassen. Die Zielgeschwindigkeiten von 10 - 30 cm/s reichen zwar nicht aus, um eine zuverlässige Aussage über den möglichen Verlauf der Weber-Quotienten über ein breites Geschwindigkeitsspektrum zu treffen (hier: 0,12 für die Zielgeschwindigkeit von 10 cm/s, 0,09 für die Zielgeschwindigkeit von 20 cm/s und 0,08 für die Zielgeschwindigkeit von 30 cm/s, Mediane über die 12 Vpn). Sie spiegeln jedoch ein bislang unvermutet

gutes kinästhetisches Unterscheidungsvermögen wider, insbesondere im Vergleich mit erhobenen Weber-Quotienten anderer somatosensorischer Sinnessysteme. Für die Unterscheidbarkeit der Geschwindigkeit von taktilen Reizen auf der Haut wird z. B. für einen weiten Geschwindigkeitsbereich von 1,5 bis 140 cm/s ein relativ schlechtes Unterscheidungsvermögen mit Weber-Quotienten von 0,20 – 0,25 angegeben (Essick et al., 1988). Auch hier drängt sich die Frage auf, ob durch methodische Veränderungen, wie einem monetären Verstärkungssystem, eine Verbesserung zu erzielen wäre. Für weitere somatosensorische Leistungen, wie das Heben von schweren Gewichten (8,6 - 29,1 kg) wird mit Weber-Quotienten von 0,03 - 0,04 ein wesentlich höheres Unterscheidungsvermögen angegeben (Karwowski et al., 1992). Für das Heben von leichten Gewichten mit der Hand gibt von Campenhausen (1981) noch wesentlich geringere Weber-Quotienten an (0,02), außer die Gewichte werden „passiv“ nur in die Hand gelegt, ohne sie hochheben zu lassen (Weber-Quotient 0,25). Für das visuelle System werden für die Unterscheidbarkeit der Geschwindigkeit von Rotationsbewegungen (Werkhoven & Koenderink, 1991) und für Random-Dot-Muster Weber-Quotienten von jeweils 0,07 angegeben.

### „Kinästhesie“ beinhaltet „Bewegung“

In Kapitel 1 (s. 1.3 „Kinästhesie versus Stellungssinn“) wurde dargelegt, daß die Wahrnehmung der Geschwindigkeit eine eigenständige und insbesondere von der Wahrnehmung der Stellung der Gliedmaßen dissoziierbare Wahrnehmungsleistung ist. Dies ist, wie oben angeführt, sowohl phänomenologisch, z. B. durch Stimulation der Muskelspindelrezeptoren, als auch neurophysiologisch, z. B. durch Einzellzellableitungen, hinreichend belegt. In neuronalen Modellen werden bereits Funktionen einzelner Neuronengruppen der Primaten im Dienste der Informationsverarbeitung (u. a. der Geschwindigkeit sowie der Gliedmaßenstellung) bei willkürlichen Armbewegungen und der Innervation der  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneurone in ihrem komplexen Zusammenspiel erfolgreich simuliert (Bullock et al., 1998). Park et al. (1999) beschreiben, wie bei der Programmierung zielgerichteter Bewegungen die Ausgangsstellung der Gliedmaßen deren Basis darstellt und die Geschwindigkeits- und Stellungsinformation zur Regulierung des Bewegungsverlaufs eingesetzt werden.

Dennoch werden unter dem Begriff „Kinästhesie“ meist Untersuchungen zum Stellungssinn oder zum taktilen Wahrnehmungsvermögen angeführt. Allenfalls finden sich zwischen den zahlreichen psychophysischen Untersuchungen zur Kinästhesie solche zur Erfassung von Detektionsschwellen, d. h. unter welchen Bedingungen eine Gliedmaßenbewegung überhaupt als solche wahrgenommen wird (Goldscheider, 1889; Cleghorn & Darcus, 1952; Kokmen et al., 1977; Gandevia et al., 1983; Hall & McCloskey, 1983; Thelen et al., 1998). Wenn Bezug auf die Bewegungsgeschwindigkeit genommen wird, bleibt deren Wahrnehmung meist unberücksichtigt (Cordo et al., 1994; Milner, 1986), bzw. deren Untersuchungen sind unzulänglich und demonstrieren eher ein Unvermögen der kinästhetischen Wahrnehmung der Bewegungsgeschwindigkeit (Grill et al., 1994, s. Einleitung, Kapitel 1, 1.1 „Untersuchungen zur Kinästhesie“).

Bis heute gibt es keine verbindlichen Regelungen, welche Sinnesleistungen unter den Begriff „Kinästhesie“ fallen bzw. nicht fallen (Review s. Hopkins, 1972). Hier wurde Kinästhesie im engeren Sinne des Wortes eingesetzt: Kinästhesie meint die Wahrnehmung der Bewegung der eigenen Körperteile in Relation zueinander. Die Gemeinsamkeit der somatosensorischen Mechanorezeptoren, nicht in einzelnen Organen, wie „Augen“ oder „Ohren“ gebündelt, sondern über die gesamte Körperfläche „verstreut“ zu sein, begründet nicht die Zusammenfassung z. B. des taktilen Sinnessystems mit dem des kinästhetischen Sinnessystems. Für Interaktionen zwischen diesen Sinnesleistungen (Collins et al., 2000), wie sie auch für andere

Sinnessysteme, z. B. dem visuellen und dem vestibulären hinlänglich bekannt sind (Dichgans & Brandt, 1978), sind - neben etwaig zu erwartenden Dominanzeffekten - auch leistungssteigernde synergistische Wirkungen nachgewiesen (Gandevia et al., 1983).

Bewegung der Gliedmaßen beinhaltet des weiteren unterschiedliche Wahrnehmungsqualitäten, wie die Wahrnehmung einer Bewegung an sich, Unterscheidung passiver und aktiver Bewegung, die Richtung der Bewegung und deren Verlauf sowie die Geschwindigkeit der Bewegung und deren Veränderung (Beschleunigungs- und Abbremsphasen). Die Wahrnehmung der Stellung der Gliedmaßen stellt wiederum eine eigenständige Sinnesleistung dar, die von den sekundären Muskelspindelrezeptoren vermittelt wird (s. 1.3).

In weit intensiver untersuchten Sinnessystemen, wie dem visuellen System, ist die getrennte Verarbeitung von wahrnehmbaren Qualitäten wie der Farbe, räumlicher Tiefe oder Bewegung in voneinander unabhängigen neuronalen Kanälen und unterschiedlichen kortikalen Gebieten hinlänglich bekannt (Zeki, 1978; Livingstone & Hubel, 1988). Nach Störungen von Hirnfunktionen bzw. Hirnläsionen kann z. B. bei erhaltener Objektwahrnehmung selektiv die Bewegungswahrnehmung ausfallen (Zihl et al., 1983). Für das kinästhetische Sinnessystem berichteten bereits Head & Holmes (1911) von zwei Patienten mit Schädigung des Thalamus, bei denen ein Verlust der kinästhetischen Bewegungswahrnehmung bei erhaltener Positionswahrnehmung der Gliedmaßen vorlag. Die Untersuchungen zur Stimulation von Muskelspindelrezeptoren mit folgend illusionärer Wahrnehmung selektiver Bewegungsqualitäten, losgelöst von der Wahrnehmung der Stellung (Goodwin et al., 1972b; McCloskey, 1973; Lackner, 1975; Goodwin, 1976; Craske, 1977; Sittig et al., 1985, 1987; Roll & Vedel, 1982), belegen, daß auch im kinästhetischen Sinnessystem für unterschiedliche Wahrnehmungsqualitäten voneinander unabhängige neuronale Kanäle existieren.

Im Bereich der Kinästhesie ist bedauerlicherweise eine Kluft zwischen fortgeschrittenem neurophysiologischen Wissen und mangelnder psychophysischer Erkenntnis zu verzeichnen. In anderen Sinnessystemen, wie z. B. dem visuellen, gab die Phänomenologie der Wahrnehmung, gestützt durch psychophysische Untersuchungsergebnisse vor, nach „welchen Neuronen die Neurophysiologen zu suchen hatten“. Im Bereich der Kinästhesie scheint die Sachlage anders geartet zu sein: Während zahlreiche neurophysiologische Befunde über das kinästhetische Sinnessystem bezüglich der Informationsverarbeitung der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen vorliegen, wurden diese in psychophysischen Studien nicht ausreichend berücksichtigt.

### Kinästhesie „aktiver“ versus „passiver“ Bewegungen

Neuartig ist auch die Methode, mit der „aktive“, von der Versuchsperson selbstinitiierte und ausgeführte Bewegungen untersucht wurden, und mit der die Versuchsperson gleichzeitig als „Stimulusgenerator“ und als „Beurteiler“ dienten.

Aufgrund der besonderen Situation einer eigenen muskulären Versorgung der für die Geschwindigkeitswahrnehmung verantwortlichen Rezeptoren war es notwendig, sogenannte „aktive“ Bewegungen zu untersuchen: Die für die Übermittlung der Dehnungsinformation der Muskeln verantwortlichen Muskelspindelrezeptoren sind in einer eigenen sogenannten intrafusalen Muskelstruktur eingebettet. Die Innervation der intrafusalen Muskulatur über die  $\gamma$ -Motoneuronen führt zu einer Längen- und damit Empfindlichkeitsänderung der Rezeptoren. Neben den Signalen aus dem Zentralnervensystem (ZNS) an die extrafusale Muskulatur zur Bewegungsausführung ( $\alpha$ -Innervation) wird mit den separaten Signalen an die intrafusale Muskulatur

( $\gamma$ -Innervation), efferent aus dem ZNS absteigend, das afferente Antwortverhalten der Muskelspindeln auf Gliedmaßenbewegungen hin gesteuert ( $\alpha$ - $\gamma$ -Koppelung).

Die Kinästhesie aktiver Bewegungen stellt zudem eine andere Sinnesqualität als die passiver Bewegungen dar. Neurophysiologisch sind nicht nur Unterschiede in der Hirnaktivität bekannt (Mountcastle et al., 1975; Soso & Fetz, 1980), aktive und passive Bewegungen werden auch in unterschiedlichen Hirnarealen (Fetz et al., 1980) bzw. von unterschiedlichen Neuronen (Lenz et al., 1994; Iwamura & Tanaka, 1996) verarbeitet.

Klassische psychophysische Verfahren sind mit willkürlich ausgeführten, „aktiven“ Bewegungen nicht anwendbar. Die Vermengung von efferenten und afferenten Informationen bei aktiven Bewegungen stellt aber kein unlösbares methodisches Problem dar. Durch adäquate Verstärkung, hier mit einem System monetärer Verstärkung („Bonus-System“), war die „efferente“ Leistung (Annäherung an die Zielgeschwindigkeit) und „afferente“ Leistung (Fällen richtiger Urteile) von Versuchspersonen nicht nur zu steuern, sondern maßgeblich zu steigern.

Die Vermengung efferenter und afferenter Informationen stellt bei Untersuchungen aktiver Bewegungen zudem den „physiologischen Grundzustand“ dar, der durch eine dynamische, sich ständig an die Gegebenheiten anpassende neuronale Aktivität über die „ $\alpha$ - $\gamma$ -Koppelung“ gekennzeichnet ist. Mit der Untersuchung aktiver Bewegungen wurde der Weg beschränkt, dieses dynamische Zusammenspiel nicht zu unterbinden, sondern auf kognitiver Ebene durch eine monetäre Verstärkung der Versuchspersonen Einfluß auf das efferente Geschwindigkeits- und afferente Urteilsverhalten zu nehmen.

Die Untersuchung von passiven Bewegungen würde sich demgegenüber methodisch ebenfalls kompliziert gestalten, da, um zu sinnvollen Ergebnissen zu gelangen, der Einfluß der intrafusalen Muskulatur auf die Muskelspindelrezeptoren kontrolliert werden muß. Dieser Einfluß ist entscheidend für die Aktivität der Muskelspindeln und somit für den kinästhetischen Informationsfluß (Wise et al., 1996; Vallbo, 1974; Al-Falahe et al., 1990). Dies erklärt auch die sehr uneinheitlichen und schwankenden psychophysischen Messergebnisse mit passiven Bewegungen, sowohl zwischen verschiedenen psychophysischen Untersuchungen, als auch intra- und interindividuell innerhalb derselben (Cleghorn & Darcus, 1952; Browne et al., 1954; Goodwin, 1976; Clark & Horch, 1986). Diese Ergebnisse führten u. a. zu der fälschlichen Annahme, daß das kinästhetische Sinnessystem kein hohes Auflösungsvermögen besitzt, bzw. kinästhetische Informationen nicht hinreichend wahrnehmbar seien (Merton, 1964).

Für die Untersuchung passiver Bewegungen wäre z. B. eine Curarisierung, d. h. eine Lähmung der Muskulatur durch ein Muskelrelaxans, notwendig. In diesem Fall wäre eine passive Führung z. B. des Armes bei gleichbleibend deaktiviertem Spannungszustand der Muskulatur möglich, ohne daß die afferenten Informationen blockiert würden. Im Gegenzug wäre es notwendig, die Untersuchung von passiv geführten Bewegungen bei anhaltend maximaler Kontraktion der intrafusalen Muskulatur durchzuführen, was eventuell auch der medikamentösen Unterstützung bedarf. Es ist keine entsprechende Untersuchung der kinästhetischen Leistungsfähigkeiten bei passiven Bewegungen bekannt.

Festzuhalten ist, daß „aktive“ und „passive“ Bewegungen zwei unterschiedliche kinästhetische Sinnesqualitäten aus identischer Reizquelle der Propriozeptoren darstellen. Irreführend wäre jedoch die Vorstellung, daß mit der Untersuchung passiver Bewegungen - wie oben vorgeschlagen mit deaktivierter versus maximal aktivierter Muskulatur - der Arbeitsbereich bzw. das Unterscheidungsvermögen der Propriozeptoren in diesem Bereich erfaßt werden könnte, der auch für aktive Bewegungen

gilt: Die Trennung aktiver und passiver Bewegungsinformationen geschieht nach bisherigem Kenntnisstand nicht auf Rezeptorebene, sondern auf zentralnervöser Ebene. D. h., wenn die Informationen aktiver Bewegungen zentralnervös verarbeitet werden, kann dies zu völlig anderen psychophysischen Resultaten führen, als wenn die identischen Informationen von passiv geführten Bewegungen in anderen kortikalen Arealen münden.

### Kinästhetische Leistung und monetäre Verstärkung

Bei Sportlern und Körperbewegungskünstlern wie Artisten oder Tänzern ist von einer hohen intrinsischen Motivation, einem „Ehrgeiz“ zum Erlernen und Trainieren spezieller Bewegungsabläufe auszugehen. Einen „Ehrgeiz“ gilt es z. B. auch bei hirngeschädigten Patienten in der Rehabilitation zu stärken oder auch zu wecken, vielmehr jedoch in einem psychophysischen Wahrnehmungsexperiment, aus dessen Durchführung für die i. d. R. gesunden Versuchspersonen keine Konsequenzen erwachsen. Mit den hier durchgeführten Experimenten wurde gezeigt, daß ein monetäres „Bonussystem“, das dem Experiment für die Versuchspersonen den Charakter eines „Geschicklichkeitsspiels“ verlieh, den Versuchspersonen bislang ungeahnt hohe kinästhetische Leistungsfähigkeiten entlockte.

Es ist davon auszugehen, daß eine solche monetäre Verstärkung, mit dem die konkrete Aufgabe und die Instruktion des Experiments für die Versuchsperson eine über die schlichten Bedürfnisse des Experimentators hinausgehende Bedeutung (ob etwas wahr- oder nicht wahrgenommen wurde) erhält, nicht nur im kinästhetischen Sinnessystem, sondern auch in der Erhebung jedweder Sinnesleistung in psychophysischen Untersuchungen zu einer Anhebung der Wahrnehmungsleistung führen kann.

Thut et al. (1997) zeigten mit einer Blutflußstudie, daß im menschlichen Gehirn durch eine Belohnung mit Geld für korrekte Antworten, statt einem bloßen „okay“ des Versuchsleiters, eine besondere Aktivität im dorsolateralen und orbitalen frontalen Kortex, als auch im Mittelhirn und im Thalamus ausgelöst wird. Thut et al. diskutieren, ob diese Aktivität an die Verarbeitung der Belohnungsinformation oder durch eine allgemeine Aktivierung „arousal“ ausgelöst wird. Sie sehen ihre Ergebnisse in Übereinstimmung mit Ergebnissen der Tierforschung bei Primaten bezüglich der Konsequenzen zielgerichteter Bewegungen. In Hinblick auf das hier eingesetzte „Bonus-System“ ist dies ein Beleg dafür, daß monetäre Verstärkung eine andere „kognitive Qualität“ als ein bloßes „verbales Lob“ besitzt, und es ist anzunehmen, daß auch die monetäre Belohnung in den hier vorgestellten Experimenten an solche Hirnaktivitäten der Versuchspersonen gekoppelt ist.

Gesucht wurde hier eine Methode, mit der eine anscheinend „ungeübte“ Sinnesleistung verbessert wurde. Klassische psychophysische Methoden waren mit aktiven Bewegungen, wie erläutert, nicht anwendbar. Methoden, wie die Signal-Entdeckungstheorie, berücksichtigen neben der Unterscheidungsfähigkeit auch das individuelle Entscheidungskriterium und sind bei aktiven Bewegungen ebenfalls nicht anwendbar. Mit der monetären Verstärkung wurde hier ein anderer Weg beschritten: Das Entscheidungskriterium wurde nicht nachträglich zur Relativierung der Unterscheidungsfähigkeit aus dem Urteilsverhalten abgeleitet, sondern die Entscheidung wurde während der Durchführung in einer Art „shaping-Prozedur“ im Sinne einer optimalen Kosten-Nutzen-Analyse für die Versuchsperson geschärft. Daß die Art und Weise des abgestuften Systems der monetären Verstärkung tatsächlich Einfluß auf die kinästhetische Leistung hatte, zeigte der Vergleich zwischen den Ergebnissen von **Experiment 2 und 3**, in denen unterschiedliche monetäre Verstärkungsregeln eingebunden waren. Der Prozentanteil richtiger Urteile stieg von ca. 62 % (s. Anhang: Tab. D-03) auf über 70 % (s. Anhang: Tab. F-03), während sich die efferente

Leistung, gemessen an der Quartildifferenzen der gemeinsamen „schneller“- und „langsamer“-Häufigkeitsverteilungen, gegenüber **Experiment 2** um ca. 9 bis 15 % den Zielgeschwindigkeiten und damit dem Unsicherheitsbereich zum Fällen eines richtigen Urteils weiter annäherte (s. Anhang: Tab. D-05 und Tab. F-05).

Wiederholt wurde in diesem Zusammenhang die Frage gestellt, ob eine monetäre Verstärkung nicht einen unzulässigen Eingriff in die experimentelle Erfassung einer Sinnesleistung darstellt. Dies ist zu verneinen. In einer psychophysischen Untersuchung kann nur über eine erbrachte Leistung auf eine zugrundeliegende „wahre“ Fähigkeit einer Versuchsperson geschlossen werden. Jede Maßnahme ist statthaft, die die Leistung der Fähigkeit annähert, solange gewährleistet ist, daß weiterhin nur die Informationen der zu untersuchenden Sinnesleistung zur Verfügung stehen. In diesen Experimenten wurde sorgsam darauf geachtet, daß den Beurteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten nur kinästhetische Informationen zu Grunde liegen. Neben dem Ausschluß anderer Sinnessysteme sind Schätzungen etwa über einen Bewegungsrhythmus, eines initialen Bewegungsimpuls, die Bewegungsstrecke oder die Dauer der Bewegung, wie auch die Analyse der Daten aus **Experiment 3** zeigte, als unwahrscheinlich zu erachten.

Es ist davon auszugehen, daß auch mit dieser Untersuchung immer noch eine Unterschätzung der „wahren“ kinästhetischen Sinnesleistung stattgefunden hat und durch Verbesserungen noch weitere Leistungssteigerungen zu erbringen sind. Sowohl durch eine Verbesserung der Rückmeldung der Bewegungsgeschwindigkeit im hier gefundenen Unterschiedsschwellenbereich als auch durch eine weitere mögliche Optimierung des Verstärkungssystems ist nicht auszuschließen, daß weitere Leistungssteigerungen erzielt werden können. Die hier gewonnenen Unterschiedsschwellen bzw. Steigungen der psychometrischen Funktionen demonstrieren zwangsläufig ein Minimum an kinästhetischer Sinnesleistung und diese liegt bereits um ein Vielfaches höher als die wenigen bisherigen Untersuchungen (Grill et al., 1994) und auch die anfänglichen Resultate aus **Experiment 1 und 2** vermuten ließen.

Der Einfluß des „Bonus-Systems“ wurde hier meist umgangssprachlich mit „Ehrgeiz“ und „Spielfreude“ in einem „Geschicklichkeitsspiel“ bezeichnet. Inwieweit besser vom Einfluß der „Motivation“ oder der „Aufmerksamkeit“ zu sprechen ist, oder alleine Begriffe der Verstärkung aus der Lernpsychologie angemessener wären, sei dahingestellt. Entscheidend ist, daß das Fällen eines Urteils in einem Wahrnehmungsexperiment einen kognitiven Prozeß darstellt und hier durch eine monetäre Verstärkung maßgeblich eine kognitive Komponente Einfluß sowohl auf die efferente Leistung (Annäherung an die Zielgeschwindigkeit) als auch die afferente Komponente (Fällung richtiger Urteile) hatte.

Hieraus stellt sich die Frage, ob durch die monetäre Verstärkung tatsächlich - im Sinne einer „shaping-Prozedur“ des operanten Konditionierens - ein kontinuierliches sensomotorisches Lernen und Schärfen des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens im Verlauf von **Experiment 3** stattgefunden hat. Dieser Schluß ist nicht zwingend: Es gibt keinen Hinweis darauf, daß sich die Leistung der einzelnen Versuchspersonen im Verlauf von **Experiment 3** verbesserte, wie der Vergleich der Steigungsmaße der psychometrischen Funktionen für die erste und zweite Hälfte der Bewegungsaufnahmen nahelegt. Die kinästhetische Leistung stieg aber schlagartig von **Experiment 2** zu **Experiment 3** an.

Zum einen ist es nun möglich, daß die kinästhetische Leistung der Versuchspersonen in **Experiment 2** alleine aufgrund der für die Erstellung von Unterschiedsschwellen erforderlichen und fehlenden Datenstruktur maskiert wurde, die erst durch die monetäre Verstärkung in **Experiment 3** sichergestellt wurde. Zum anderen spricht

nichts dafür, daß sich die kinästhetische Unterscheidungsfähigkeit der Versuchspersonen in **Experiment 3** gegenüber denen von **Experiment 2** als solche verbessert haben sollte. Daß diese drastische Leistungssteigerung durch eine Zufallsauswahl „schlechter“ Versuchspersonen in **Experiment 1 und 2** versus „guter“ Versuchspersonen in **Experiment 3** zurückzuführen ist, ist als unwahrscheinlich zu erachten. Durch die unabhängigen Stichproben wurde vielmehr gewährleistet, daß kein Lerneffekt für die Leistungssteigerungen verantwortlich war. Der Einfluß des Bonus-Systems auf die Leistung zeichnete sich im übrigen auch während der notwendigen Testphasen zur Erprobung der Programmabläufe in hier nicht dargestellten Vorversuchen mit zusätzlichen einzelnen Versuchspersonen ab.

Die Resultate sprechen jedoch vielmehr dafür, daß das System der monetären Verstärkung einen Einfluß auf die kognitive Einstellung zum Fällen eines Urteils bewirkte. Anzunehmen ist ein erhöhtes Aufmerksamkeitsniveau für die Ausführung der Aufgabe. Bereits in Tierexperimenten wurde gezeigt, daß aufgabenspezifisch „bedeutungsvolle“ Reize, z. B. spezifische Hinweisreize für die belohnte Ausführung einer bestimmten Bewegung, gegenüber „bedeutungslosen“ Reizen zu einer verstärkten Aktivität somatosensorischer Neuronen im parietalen Kortex führen (Hyvarinen, 1982; Bushnell et al., 1981; Robinson et al., 1978; Mountcastle et al., 1975). Diesen Neuronen wird eine Rolle in der Lenkung der gerichteten Aufmerksamkeit zugeschrieben (Stein, 1989). Im Humanbereich ist der Einfluß der Aufmerksamkeitslenkung auf taktile Reize bekannt (Craig & Rollman, 1999) und auch für kinästhetische Reize zu erwarten. Tomberg (1999) zeigte, daß bei der Aufgabe, passive Fingerbewegungen zu diskriminieren, die Lenkung der Aufmerksamkeit auf taktile versus kinästhetische Informationen sowie die Lenkung der Aufmerksamkeit auf beide Informationsquellen zu voneinander zu differenzierenden Effekten in evozierten Hirnpotentialen führt, deren Wellenkomponenten kognitiven Prozessen zugeordnet werden. Piek et al. (1999) zeigten, daß Kinder mit hyperaktivem Störungsbild kinästhetisch-motorische Defizite aufweisen, die in der Subgruppe mit Aufmerksamkeitsstörungen insbesondere für feinmotorische Leistungen ausgeprägter sind.

Entscheidend für die Ergebnisse der hier vorgestellten Experimente ist, daß mit dem System einer monetären Verstärkung eine erhebliche kinästhetische Leistungssteigerung zu erzielen war und gezeigt wurde, daß die Konsequenzen eines Urteils für die Vp auch in „einfachen“ Wahrnehmungsexperimenten einen erheblichen Einfluß auf das Ergebnis haben.

### Kinästhesie und apparative Erfassung der Bewegungsgeschwindigkeit

Den Unterschiedsschwellen wurden hier lineare und keine Winkelgeschwindigkeiten zugrunde gelegt. Da sich unterschiedliche Arm-, Hand- u. Fingerlängen bei der Ausführung zielgerichteter Bewegungen auf dieselben räumlichen Umgebungsbedingungen beziehen und die Sensitivität auf diese adaptiert ist, stellen lineare Geschwindigkeiten das angemessene interindividuelle Vergleichsmaß dar. Dieser Vorgehensweise entspricht der Befund, daß die Berücksichtigung der Winkelgeschwindigkeit paradoxerweise zu einer höheren Sensitivität für grobe, proximale Bewegungen (z. B. des Armes im Schultergelenk) gegenüber feinen distalen Effektoren (Finger) führt, sich die Aussage jedoch umkehrt, wenn statt der Winkelgeschwindigkeit die lineare Geschwindigkeit zugrunde gelegt wird (Hall & McCloskey, 1983).

Zur Methode der Erfassung der Geschwindigkeit mit aktiven Bewegungen ist folgendes kritisch anzumerken. Es ist nicht bekannt, wie das Zentralnervensystem (ZNS) kinästhetische Geschwindigkeitsinformationen verarbeitet. Wird der gesamte Bewegungsverlauf mit Beschleunigungs- und Abbremsphase berücksichtigt, die Spitzengeschwindigkeit oder der von der Geschwindigkeit her gleichförmigste Bewegungsanteil? Oder ist der Beschleunigungsimpuls zu Beginn der Bewegung, die letzten

Millisekunden des im Arbeitsgedächtnis verbliebenen Bewegungsanteils oder ein irgendwie geartetes gewichtetes Maß, in das der Gesamtverlauf der Bewegung und der Bewegungsintention eingeht, entscheidend? In Experimenten mit passiv geführten Bewegungen wäre bei einer konstanten Geschwindigkeitsführung die Geschwindigkeitsbestimmung eindeutig. Mit aktiven und ein natürliches Geschwindigkeitsprofil aufweisenden Bewegungen wurde hier davon ausgegangen, daß die Bewegungsgeschwindigkeit in angemessener Weise durch das Steigungsmaß der linearen Regression der kumuliert zurückgelegten Strecke über die Zeit erfaßt wurde. Es wurde argumentiert, daß bei einem strikten Kriterium eines hohen Bestimmtheitsmaßes die einander gegenläufigen Beschleunigungs- und Abbremsphasen einer Bewegung keinen größeren Einfluß auf die Berechnung der Geschwindigkeit besitzen. Die erfaßten Unterschiedsschwellen können nur so gut sein, wie die Operationalisierung der Geschwindigkeit den tatsächlichen Geschwindigkeitsverlauf beschreibt. Eine Inkongruenz für die Versuchsperson zwischen Wahrnehmung und experimenteller Rückmeldung spiegelt die Grenze der Geschwindigkeitsrückmeldung und nicht der Wahrnehmungsfähigkeit wider. Die erfolgreiche Bestimmung von Unterschiedsschwellen in **Experiment 3** zeigt zumindest, daß die Vorgehensweise mit dem linearen Steigungsmaß in cm/s geeignet ist, die Geschwindigkeitswahrnehmung zu quantifizieren. Damit wird nicht ausgeschlossen, daß die Wahrnehmungsleistung durch andere Rückmeldungsmethoden der Bewegungsgeschwindigkeit noch weiter zu verbessern ist.

Die computertechnischen Möglichkeiten zur zeitlich-räumlichen Erfassung des Verlaufs von Gliedmaßenbewegungen haben sich seit der Planung und Durchführung der hier vorgestellten Versuche außerordentlich verbessert. Das vielfach gesteigerte zeitliche u. räumliche Auflösungsvermögen, die vielfach erhöhte Speicherkapazität und Berechnungsgeschwindigkeit ermöglichen wesentlich exaktere Rückmeldungsmöglichkeiten auch länger anhaltender Bewegungen über größere Strecken. Auch ist eine unmittelbare, allenfalls nur unwesentlich verzögerte Rückmeldung der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit während der Bewegungsausführung möglich (in diesen Experimenten lag zwischen Beendigung der Bewegungsausführung und der visuellen Rückmeldung ein Intervall von maximal einer Sekunde) und damit eine geringere Belastung der Aufmerksamkeitsspanne für die Bewegungsgeschwindigkeit, d.h. der unmittelbaren Gedächtnisleistung, ohne daß eine bleibende Gedächtnisab-speicherung erfolgen muß (dabei ist jedoch anzunehmen, daß ein Urteil von den Versuchspersonen bereits während der mit möglichst konstanter Geschwindigkeit auszuführenden Bewegung gefällt wurde und vorwiegend der geforderte Vergleich mit der Zielgeschwindigkeit eine Anforderung an die Gedächtnisleistung stellte). Die Aussage der hier vorgestellten Ergebnisse über die Wahrnehmbarkeit und die psychophysische Untersuchbarkeit kinästhetischer Geschwindigkeitsinformationen wird durch diese technischen Verbesserungen zwar nicht geschmälert. Vorstellbar ist jedoch, daß durch die Reduzierung der technischen Meßfehler und die Ungenauigkeit der rückgemeldeten Bewegungsgeschwindigkeit die Erfassung noch niedrigerer Unterschiedsschwellen zu erreichen ist. Des weiteren wäre nun z. B. die Aufzeichnung andauernder kreisförmiger Bewegungen der Gliedmaßen möglich, mit der Aufgabe, die („online“ exakt rückmeldbare) Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt der Bewegung konstant zu halten oder das Vermögen, eine Bewegung kontrolliert zu beschleunigen und abzubremesen.

### Bedeutung des kinästhetischen Unterscheidungsvermögens

Wozu ist aber nun die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen nütze? Hoch automatisierte Bewegungsabläufe, wie z. B. das Benutzen von Messer und Gabel oder das Fahrradfahren, sind prozedurale Fähigkeiten, zu

deren erfolgreichen Ausführung keine bewußte Wahrnehmung der einzelnen Bewegungsqualitäten erforderlich ist, da diese den Bewegungsablauf eher stören würden. Bei langsamen Bewegungsabläufen unter sensorischer Führung, wie z. B. das Einfädeln eines Fadens in ein Nadelöhr ist die Geschwindigkeit der Bewegung jedoch bedeutsam. Solche Bewegungen erfolgen i. d. R. unter multisensorischer Kontrolle, wobei das visuelle System meist dominant erscheint und der Bewegungsablauf vor allem aufgrund der visuellen Latenz verlangsamt werden muß, um die Positionsgenauigkeit kontrollieren zu können.

Eine bewußte kinästhetische Geschwindigkeitskontrolle erscheint vor allem dann sinnvoll und notwendig, wenn Bewegungsabläufe erlernt oder gelernte Bewegungsabläufe modifiziert werden sollen. Auch dann liegt normalerweise eine multisensorische Kontrolle vor und unbestritten ist, daß das Zusammenspiel unterschiedlicher Sinnesleistungen, auch der verschiedenen Propriozeptoren (Gandevia et al., 1983), zu einer Optimierung führt. Genauso wie bei einer propriozeptiven Deafferentierung andere Sinnessysteme kompensatorisch einspringen, ist nun vorstellbar, daß beim Ausfall einer Sinnesleistung, wie z. B. bei blinden Menschen, eine höhere kinästhetische Leistung bei Bewegungsabläufen erbracht werden kann. Um die spezifische Leistungsfähigkeit der kinästhetischen Geschwindigkeitswahrnehmung erfassen zu können, ist jedoch die experimentelle Reduktion der Reizdarbietung auf die Muskelrezeptoren durch Ausschluß der anderen Sinnesrückmeldungen notwendig. Die hier gezeigte und bislang unvermutete kinästhetische Unterscheidungsleistung der Geschwindigkeit der Gliedmaßenbewegungen erhebt diese zum Kandidaten sowohl zum Aufbau bzw. zum Training einer systematischen Verbesserung bestehender sensomotorischer Leistungen, als auch für Kompensationsstrategien in der Rehabilitation. Ein kinästhetisches Lernvermögen ist über die kontinuierliche Ontogenese im Kindesalter (Visser & Geuze, 2000) auch beim Erwachsenen anzunehmen. Bei Parkinson-Patienten wurde eine Verschlechterung der propriozeptiven Kontrolle bei Bewegungsabläufen demonstriert, durch Übung war insbesondere in der Geschwindigkeit der geforderten Bewegungsausführung eine Verbesserung zu erzielen (Swinnen et al., 2000).

Welchen praktischen Beitrag kann die Kenntnis der Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit der Gliedmaßenbewegungen und insbesondere die Kenntnis der hier sich als überraschend hoch darstellenden kinästhetischen Sensitivität leisten? Neben dem Verständnis des Erlernens von Bewegungsabläufen während der Ontogenese, ist sie, unabhängig vom Alter, für das Erlernen besonderer sportlicher und/oder bewegungskünstlerischer, tänzerischer oder artistischer Leistungen nützlich einsetzbar. Fery & Morizot (2000) demonstrierten, daß Sportler von der kinästhetischen versus visuellen Vorstellung von einzutrainierenden Bewegungsabläufen beim Tennis-Spiel profitierten. Auf der klinischen Seite ist denkbar, diese Kenntnis in Maßnahmen zur Rehabilitation von Bewegungsstörungen nach Hirnschädigungen oder zur Kompensation beim Ausfall eines Sinnessystems einzubringen. Das klingt vielleicht trivial. Zu beachten ist jedoch, daß auch heute noch oftmals davon ausgegangen wird, daß kinästhetische Sinnesleistungen dem Bewußtsein nur sehr eingeschränkt zugänglich sind.

Rein kinästhetische Störungsbilder wurden nach kombinierten Hirnschädigungen in temporo-occipitalen Gebieten und dem Pulvinar berichtet (Takahashi & Kawamura, 1998). Die Patienten waren mit ihren kontralateralen Gliedmaßen unter alleiniger kinästhetischer Kontrolle und Wegfall der visuellen Kontrolle nicht mehr in der Lage, zielgerichtete Bewegungen auch im Erfassen eigener Körperteile, auszuführen, ohne daß motorische oder ataktische Störungen vorlagen. Aber auch für das Verständnis von klassischen neuropsychologischen Störungsbildern, wie Aphasien, Neglect, Apraxien oder prozeduralen Gedächtnisstörungen, ist eine Beteiligung oder eine

ursächliche Störung in der kinästhetischer Informationsverarbeitung denkbar.

Insbesondere das Wesen apraktischer Störungen ist noch weitgehend unklar. Bei apraktischen Störungen sind Patienten mit spezifischen Hirnschädigungen nicht in der Lage, nach verbaler oder pantomimischer Aufforderung, vorgegebene Bewegungsabläufe auszuführen oder Gliedmaßenstellungen einzunehmen, ohne daß die Kraft, die Innervation der benötigten Muskeln oder das Verständnis der Aufgabe ursächlich beeinträchtigt sind. Apraxien werden des weiteren oftmals von dem Phänomen begleitet, daß die betroffenen Patienten im situativen Kontext die Bewegungen spontan korrekt ausführen. Es ist bislang nicht bekannt, inwieweit an der apraktischen Bewegungsstörung möglicherweise eine gestörte kinästhetische Informationsverarbeitung für die Initiierung und Ausführung der Bewegungen unter sensorischer Kontrolle beteiligt sein kann. Für spontane, automatisiert ablaufende Bewegungen ist denkbar, daß für deren kinästhetische Kontrolle als Abruf prozeduraler Gedächtnisinhalte möglicherweise andere zentralnervöse Routinen benutzt werden. Die Erkundung des grundlegenden kinästhetischen Wahrnehmungsvermögens apraktischer Patienten im Vergleich zu Gesunden wurde bislang nicht angestrebt, da bislang auch keine kinästhetischen Leistungsfähigkeiten im engeren Sinne beim Gesunden psychophysisch erfaßt wurden.

### **6.3 Zusammenfassung der wesentlichen Implikationen der Ergebnisse**

Die wesentlichen Implikationen aus den vorgestellten Ergebnissen sind:

- 1.) Die kinästhetische Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit der eigenen Gliedmaßenbewegungen stellt eine psychophysisch untersuchbare Wahrnehmungsqualität dar. Die hier erstmalig erhobenen Unterschiedsschwellen demonstrieren ein hohes Unterscheidungsvermögen gesunder Versuchspersonen, das bislang erheblich unterschätzt bzw. fälschlicherweise in Abrede gestellt wurde. Für das kinästhetische Sinnessystem besteht ein Nachholbedarf in der Zusammenführung gegebener neurophysiologischer und mangelnder psychophysischer Erkenntnisse.
- 2.) Das kinästhetische Sinnessystem ist als Wahrnehmung der Bewegung der eigenen Körperteile in Relation zueinander zu definieren, die auf den afferenten Informationen von spezifischen Propriozeptoren beruhen. Es ist als eigenständiges Sinnessystem, auch unter den somatosensorischen Sinnessystemen, aufzufassen. Es beinhaltet unterschiedliche Wahrnehmungsqualitäten, wie die der Bewegung als solche, der Bewegungsrichtung sowie der Bewegungsgeschwindigkeit und deren Veränderungen im Bewegungsverlauf. Insbesondere ist die Kinästhesie getrennt von der Wahrnehmung der Stellung der Gliedmaßen zu betrachten.
- 3.) Darüber hinaus stellen willkürliche „aktive“ versus „passiv“ geführte Bewegungen zwei voneinander unterscheidbare kinästhetische Sinnesleistungen dar, deren in das ZNS aufsteigende Informationen nach heutigem Wissensstand zwar von identischen Propriozeptoren stammen, aber im ZNS von unterschiedlichen Neuronen verarbeitet werden.
- 4.) Solche willkürlichen „aktiven“ Bewegungen sind psychophysischen Untersuchungen zugänglich, in denen die Versuchspersonen sowohl als „Stimulusgenerator“, als auch als „Beurteiler“ dienen. Dies wurde mit einer neuartigen psychophysischen Methode demonstriert.

5.) In psychophysischen Untersuchungen ist der Einfluß der Bedeutung der Konsequenz eines Wahrnehmungsurteils für die Versuchsperson zu berücksichtigen. Durch adäquate Verstärkung, hier durch ein System monetärer Verstärkung, ist eine erhebliche Steigerung in der Erfassung der Unterscheidungsfähigkeit zu erwarten. Dies wurde mit den Experimenten eindrücklich belegt und dürfte nicht nur auf das kinästhetische Sinnessystem begrenzt sein.

6.) Das Wissen, daß

a) die Geschwindigkeit von Bewegungen der eigenen Gliedmaßen entgegen der bisherigen Auffassung kinästhetisch wahrnehmbar und unterscheidbar ist,

b) aktiv ausgeführte Bewegungen eine andere Informationsquelle für das ZNS als passiv geführte Bewegungen darstellen und

c) die kinästhetische Leistung durch Verstärkung erheblich zu steigern ist,

sollte dazu anregen, diese Erkenntnis zum Aufbau und zur Verbesserung sensorischer Leistungen einzusetzen. Zur Anwendung bieten sich in erster Linie sportliche und bewegungskünstlerische Disziplinen, die Entwicklungspsychologie bei der Behandlung sensomotorischer Leistungsdefizite sowie die klinische Neuropsychologie bei der Rehabilitation hirngeschädigter Patienten an. Auch bei der Erforschung neuropsychologischer Störungsbilder ist das kinästhetische Sinnessystem bislang nicht zur Genüge berücksichtigt.

Darüber hinaus ist nicht anzunehmen, daß der hier gefundene Einfluß der Verstärkung auf die Wahrnehmungsleistung der Versuchspersonen auf psychophysische Untersuchungen des kinästhetischen Sinnessystems beschränkt ist.

## Anhang A

### Experiment 1: Tab. A-01 bis A-05

	L	M	S
Vp1	73	84	84
Vp2	88	85	70
Vp3	89	90	18
Vp4	81	88	33
Vp5	90	88	68
Vp6	90	90	84
Vp7	85	86	29
Vp8	84	89	47
Vp9	53	80	71
Vp10	86	89	89
Vp11	80	88	51
Vp12	89	89	83
<b>Median</b>	<b>85,5</b>	<b>88,0</b>	<b>69,0</b>

#### Tab. A-01:

Anzahl der Bewegungsaufnahmen mit einem Bestimmtheitsmaß  $\geq 0,98$  pro Vp (N=12) und angestrebter Zielgeschwindigkeit

- „Langsam“ (10 cm/s),
- „Mittelschnell“ (20 cm/s),
- „Schnell“ (40 cm/s)

(maximal 90 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit).

Tab. 3-02 a) Anzahl der "gleichschnell"-Urteile				Tab. 3-02 b) Prozentanteil der "gleichschnell"-Urteile			
	L	M	S		L	M	S
Vp1	60	69	64	Vp1	82,19	82,14	76,19
Vp2	44	41	36	Vp2	50,00	48,24	51,43
Vp3	81	72	17	Vp3	91,01	80,00	94,44
Vp4	73	71	26	Vp4	90,12	80,68	78,79
Vp5	66	80	59	Vp5	73,33	90,91	86,76
Vp6	85	79	63	Vp6	94,44	87,78	75,00
Vp7	81	78	28	Vp7	95,29	90,70	96,55
Vp8	62	75	36	Vp8	73,81	84,27	76,60
Vp9	47	80	71	Vp9	88,68	100,00	100,00
Vp10	75	85	74	Vp10	87,21	95,51	83,15
Vp11	73	81	34	Vp11	91,25	92,05	66,67
Vp12	89	84	73	Vp12	100,00	94,38	87,95
<b>Median</b>	<b>73,0</b>	<b>78,5</b>	<b>47,5</b>	<b>Median</b>	<b>89,40</b>	<b>89,24</b>	<b>80,97</b>

Tab. 3-02 c) Anzahl der "langsamer"-Urteile				Tab. 3-02 d) Prozentanteil der "langsamer"-Urteile			
	L	M	S		L	M	S
Vp1	3	10	10	Vp1	4,11	11,90	11,90
Vp2	23	26	17	Vp2	26,14	30,59	24,29
Vp3	3	12	1	Vp3	3,37	13,33	5,56
Vp4	7	9	4	Vp4	8,64	10,23	12,12
Vp5	12	6	3	Vp5	13,33	6,82	4,41
Vp6	3	7	17	Vp6	3,33	7,78	20,24
Vp7	3	8	1	Vp7	3,53	9,30	3,45
Vp8	14	5	11	Vp8	16,67	5,62	23,40
Vp9	0	0	0	Vp9	0,00	0,00	0,00
Vp10	2	3	2	Vp10	2,33	3,37	2,25
Vp11	1	3	14	Vp11	1,25	3,41	27,45
Vp12	0	4	7	Vp12	0,00	4,49	8,43
<b>Median</b>	<b>3,0</b>	<b>6,5</b>	<b>5,5</b>	<b>Median</b>	<b>3,45</b>	<b>7,30</b>	<b>10,17</b>

Tab. 3-02 e) Anzahl der "schneller"-Urteile				Tab. 3-02 f) Prozentanteil der "schneller"-Urteile			
	L	M	S		L	M	S
Vp1	10	5	10	Vp1	13,70	5,95	11,90
Vp2	21	18	17	Vp2	23,86	21,18	24,29
Vp3	5	6	0	Vp3	5,62	6,67	0,00
Vp4	1	8	3	Vp4	1,23	9,09	9,09
Vp5	13	2	6	Vp5	14,44	2,27	8,82
Vp6	2	4	4	Vp6	2,22	4,44	4,76
Vp7	1	0	0	Vp7	1,18	0,00	0,00
Vp8	8	9	0	Vp8	9,52	10,11	0,00
Vp9	6	0	0	Vp9	11,32	0,00	0,00
Vp10	9	1	13	Vp10	10,47	1,12	14,61
Vp11	6	4	3	Vp11	7,50	4,55	5,88
Vp12	0	1	3	Vp12	0,00	1,12	3,61
<b>Median</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>Median</b>	<b>8,51</b>	<b>4,49</b>	<b>5,32</b>

#### Tab. A-02 a) bis f):

Anzahl (1. Spalte) und Prozentanteil (2. Spalte) der Urteile

- „langsamer“
- „gleichschnell“
- „schneller“

pro Vp (N=12) und angestrebter Zielgeschwindigkeit

- „Langsam“ (10 cm/s),
- „Mittelschnell“ (20 cm/s),
- „Schnell“ (40 cm/s)

(maximal 90 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit).

	Ziel- geschwindigkeit	Median	Quartil- differenz
Vp 1	"Langsam" (10cm/s)	10,29	3,15
	"Mittel" (20cm/s)	21,98	3,78
	"Schnell" (30cm/s)	45,48	4,80
Vp 2	"Langsam" (10cm/s)	13,35	2,24
	"Mittel" (20cm/s)	25,67	4,45
	"Schnell" (30cm/s)	39,87	5,51
Vp 3	"Langsam" (10cm/s)	10,45	2,89
	"Mittel" (20cm/s)	21,57	3,41
	"Schnell" (30cm/s)	41,91	9,22
Vp 4	"Langsam" (10cm/s)	11,87	3,07
	"Mittel" (20cm/s)	17,48	2,28
	"Schnell" (30cm/s)	49,81	6,30
Vp 5	"Langsam" (10cm/s)	8,29	2,60
	"Mittel" (20cm/s)	23,32	3,25
	"Schnell" (30cm/s)	53,37	7,00
Vp 6	"Langsam" (10cm/s)	9,91	1,81
	"Mittel" (20cm/s)	21,37	3,84
	"Schnell" (30cm/s)	44,03	4,81
Vp 7	"Langsam" (10cm/s)	11,19	3,12
	"Mittel" (20cm/s)	20,82	2,47
	"Schnell" (30cm/s)	49,68	8,04
Vp 8	"Langsam" (10cm/s)	14,00	3,67
	"Mittel" (20cm/s)	19,65	3,38
	"Schnell" (30cm/s)	34,18	7,11
Vp 9	"Langsam" (10cm/s)	14,35	3,07
	"Mittel" (20cm/s)	22,73	7,72
	"Schnell" (30cm/s)	41,11	5,34
Vp10	"Langsam" (10cm/s)	8,15	2,59
	"Mittel" (20cm/s)	23,99	4,49
	"Schnell" (30cm/s)	39,90	5,80
Vp11	"Langsam" (10cm/s)	11,06	3,08
	"Mittel" (20cm/s)	20,43	3,85
	"Schnell" (30cm/s)	38,60	7,74
Vp12	"Langsam" (10cm/s)	6,51	1,42
	"Mittel" (20cm/s)	19,19	3,07
	"Schnell" (30cm/s)	38,03	4,67

**Tab. A-03:**  
Median und Quartildifferenzen der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen pro Vp (N=12) und angestrebter Zielgeschwindigkeit.

Angestrebte Zielgeschwindigkeit	Quartil-differenz ( cm/s)	Prozentuale Abweichung von der Zielgeschwindigkeit
10 cm/s	2,62	13,1
20 cm/s	3,73	9,4
30 cm/s	4,84	8,1
40 cm/s	5,95	7,5

**Tab. A-04:**  
Vorhersage der Quartildifferenzwerte (Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s) für die Häufigkeitsverteilungen der als „gleichschnell“ beurteilten Bewegungsausführungen für verschiedene Zielgeschwindigkeiten aus der linearen Regressionsgleichung über alle Vpn (N=12).

Prozentuale Abweichung des Quartildifferenzbereichs von der Zielgeschwindigkeit, jeweils nach oben und unten.

	Ziel- geschwindigkeit	Steigung	Ordinaten- schnittpunkt	Bestimmt- heitsmaß
Vp 1	"Langsam" (10cm/s)	0,04	9,35	0,11
	"Mittel" (20cm/s)	-0,02	23,46	0,02
	"Schnell" (30cm/s)	0,05	43,42	0,05
Vp 2	"Langsam" (10cm/s)	0,01	13,15	0,01
	"Mittel" (20cm/s)	0,08	23,72	0,07
	"Schnell" (30cm/s)	0,09	37,79	0,05
Vp 3	"Langsam" (10cm/s)	-0,03	12,52	0,15
	"Mittel" (20cm/s)	0,02	20,78	0,05
	"Schnell" (30cm/s)	0,18	40,72	0,02
Vp 4	"Langsam" (10cm/s)	0,03	10,84	0,07
	"Mittel" (20cm/s)	-0,02	18,28	0,04
	"Schnell" (30cm/s)	-0,35	55,49	0,18
Vp 5	"Langsam" (10cm/s)	-0,06	9,91	0,42
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	23,32	0,00
	"Schnell" (30cm/s)	-0,01	53,95	0,00
Vp 6	"Langsam" (10cm/s)	-0,02	11,47	0,16
	"Mittel" (20cm/s)	0,01	21,05	0,02
	"Schnell" (30cm/s)	0,01	43,43	0,00
Vp 7	"Langsam" (10cm/s)	0,06	8,85	0,40
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	20,97	0,00
	"Schnell" (30cm/s)	0,50	43,53	0,44
Vp 8	"Langsam" (10cm/s)	-0,05	15,28	0,10
	"Mittel" (20cm/s)	-0,01	20,40	0,01
	"Schnell" (30cm/s)	-0,23	38,96	0,27
Vp 9	"Langsam" (10cm/s)	-0,09	16,45	0,37
	"Mittel" (20cm/s)	-0,17	30,40	0,71
	"Schnell" (30cm/s)	0,05	39,18	0,09
Vp10	"Langsam" (10cm/s)	-0,05	10,62	0,25
	"Mittel" (20cm/s)	0,07	20,75	0,26
	"Schnell" (30cm/s)	-0,11	43,94	0,38
Vp11	"Langsam" (10cm/s)	-0,01	11,70	0,01
	"Mittel" (20cm/s)	-0,09	24,62	0,42
	"Schnell" (30cm/s)	-0,25	43,94	0,24
Vp12	"Langsam" (10cm/s)	-0,02	7,67	0,26
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	19,17	0,00
	"Schnell" (30cm/s)	-0,04	39,61	0,04
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>-0,02</b>	<b>11,16</b>	<b>0,15</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>0,00</b>	<b>21,01</b>	<b>0,03</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>0,00</b>	<b>43,42</b>	<b>0,07</b>

**Tab. A-05:**  
Verlauf der  
Bewegungs-  
geschwindigkeiten der  
als „gleichschnell“  
beurteilten  
Bewegungsaufnahmen  
pro Vp (N=12) und  
Zielgeschwindigkeit  
(lineare Regressions-  
werte).

## **Anhang B**

### **Experiment 1: Abb. B-01 bis B-12**

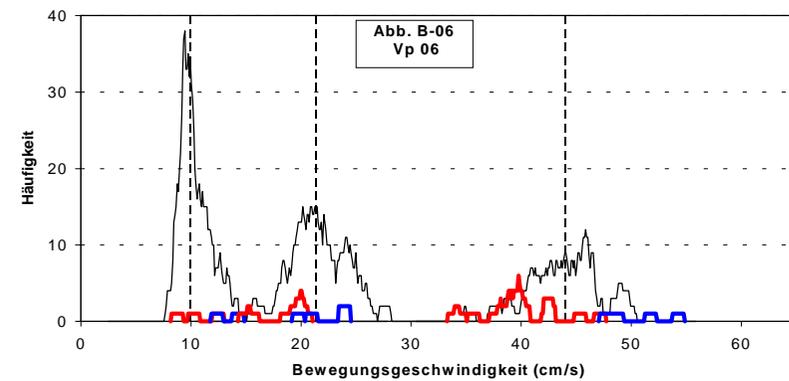
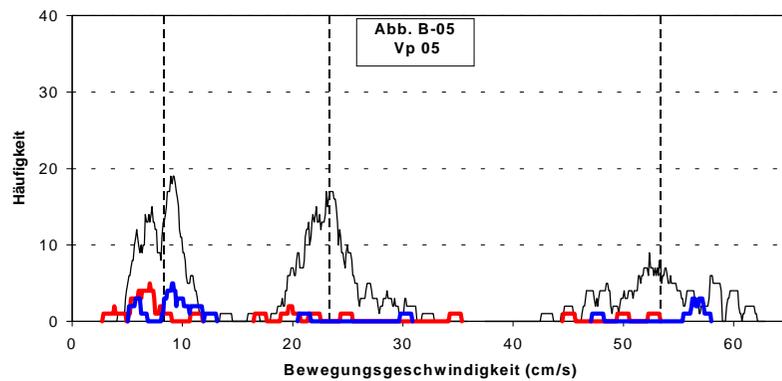
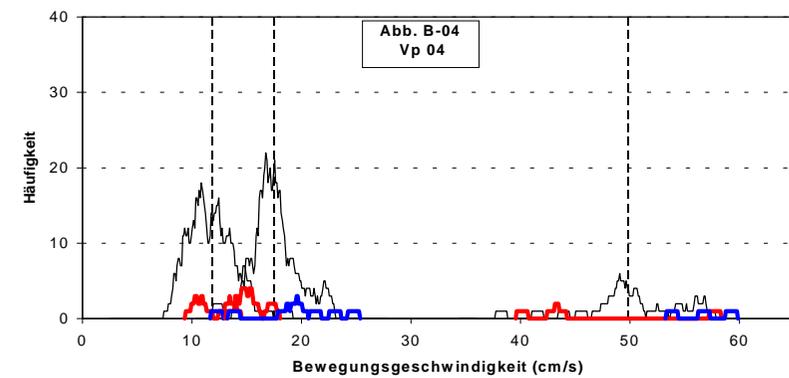
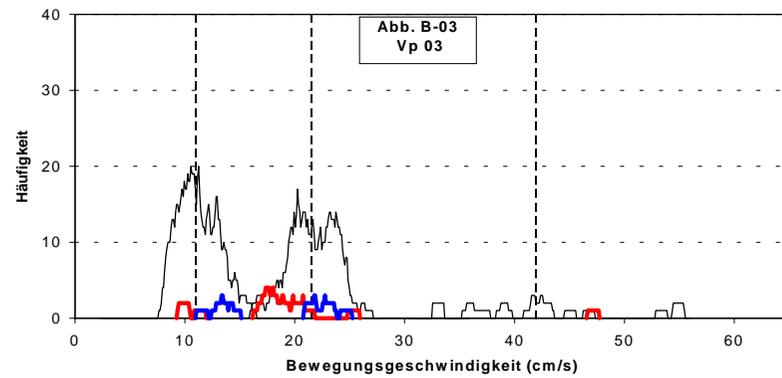
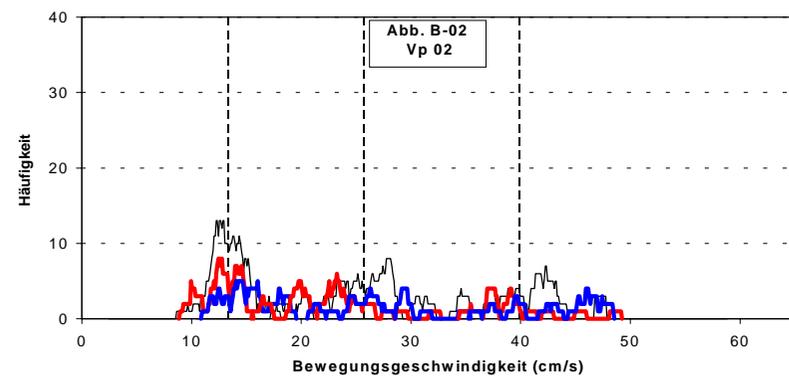
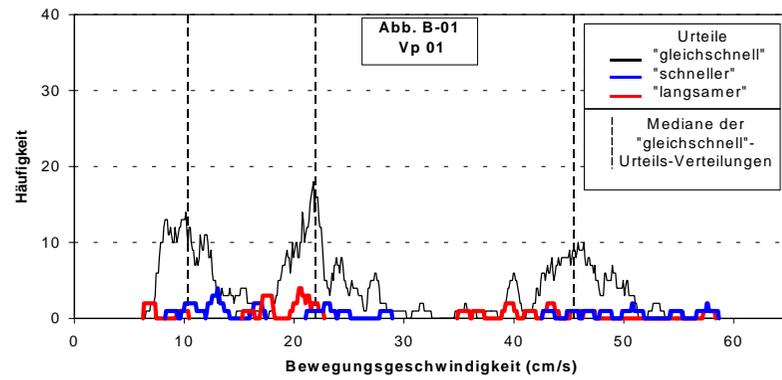
---

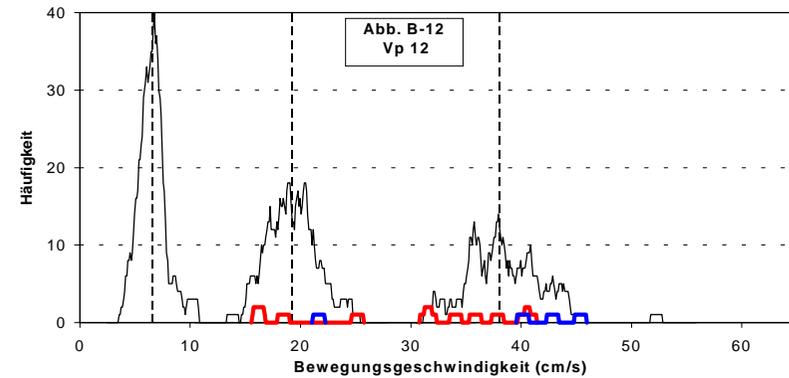
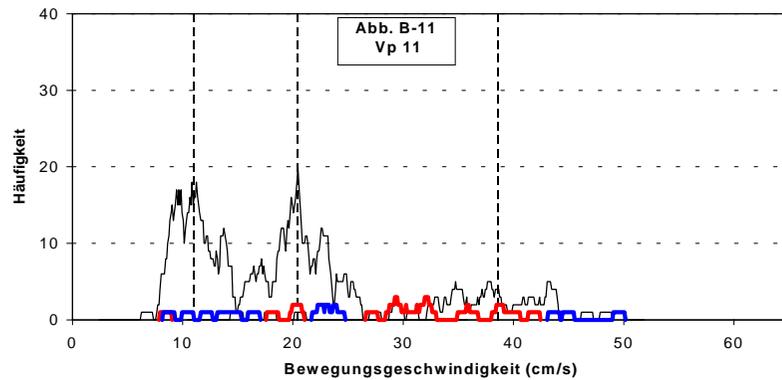
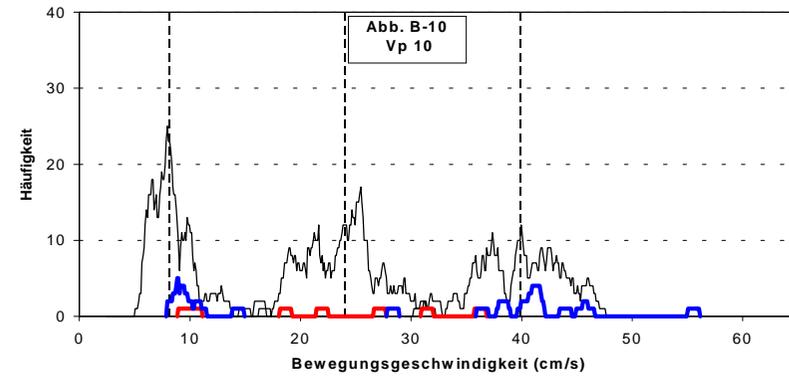
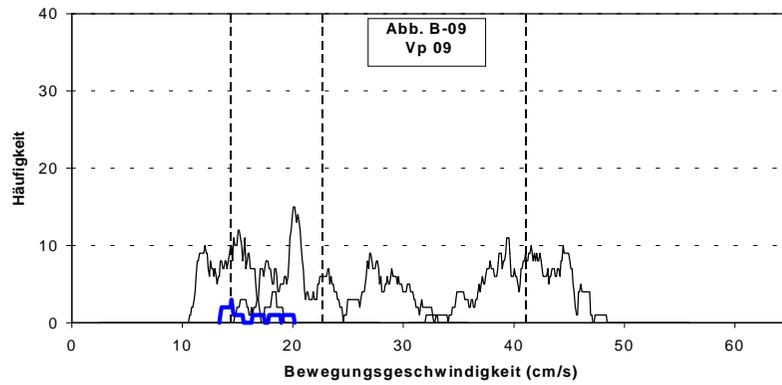
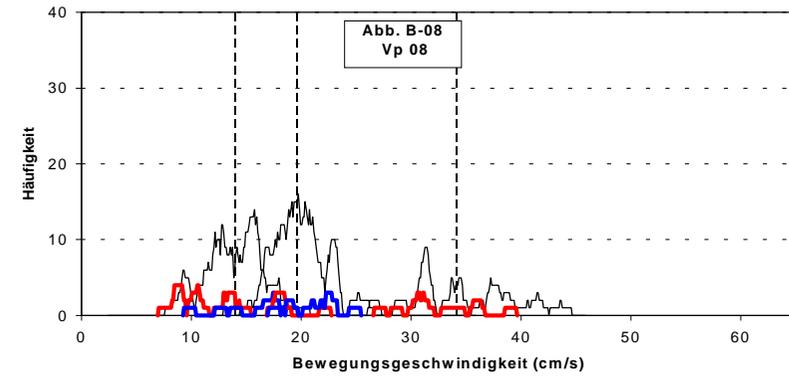
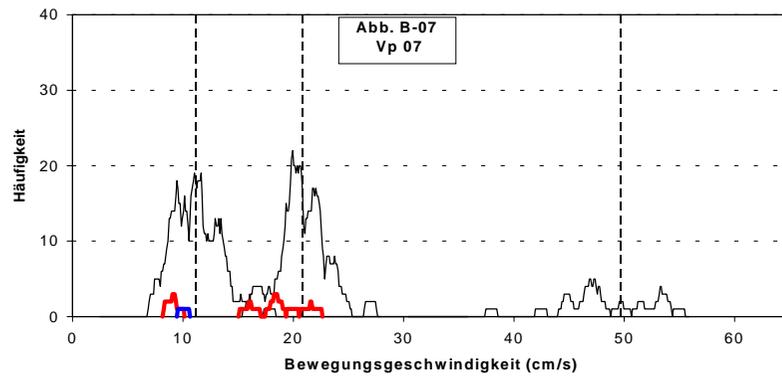
Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s) pro

- $V_p$  (N=12),
- Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (40 cm/s) )  
und
- Urteilkategorie („langsamer“ / „gleichschnell“ / „schneller“ ).

Gleitende Mediane pro 1 cm/s Intervall in 0,1 cm/s-Schritten.

Die individuellen Mediane der „gleichschnell“-Häufigkeitsverteilungen sind durch gestrichelte, senkrechte Linien markiert.





## **Anhang C**

### **Experiment 1: Abb. C-01 bis C-12**

---

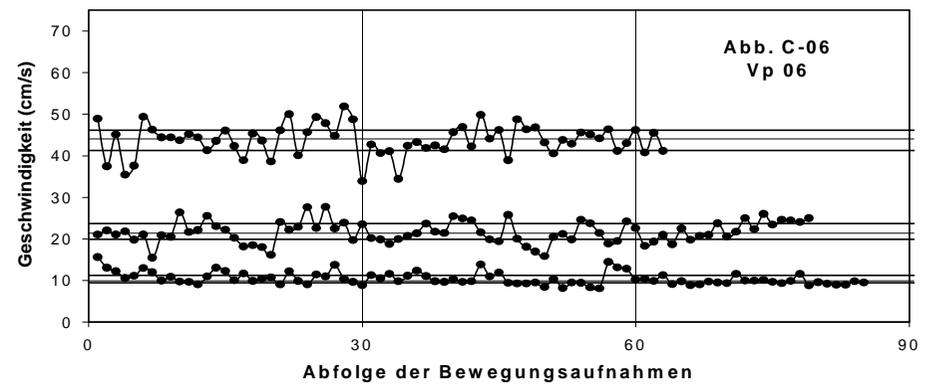
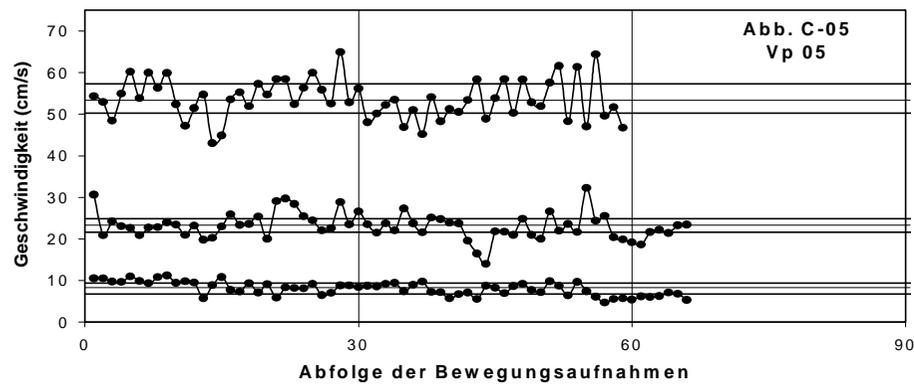
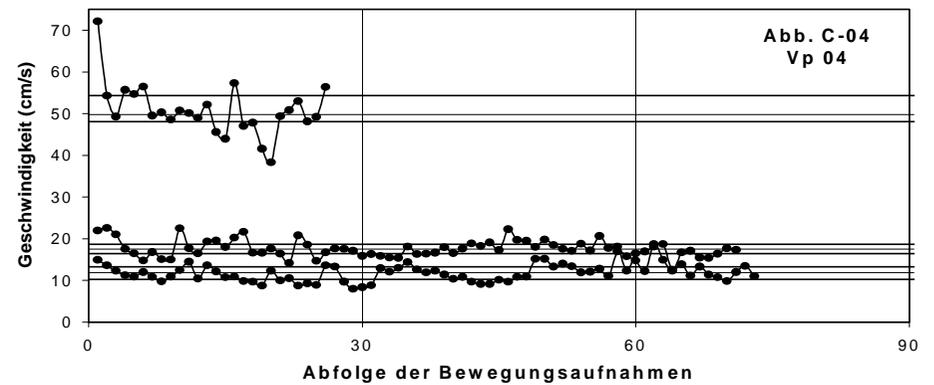
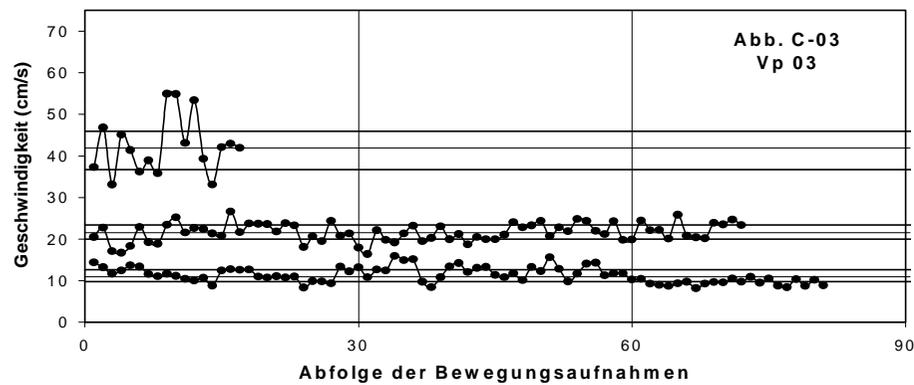
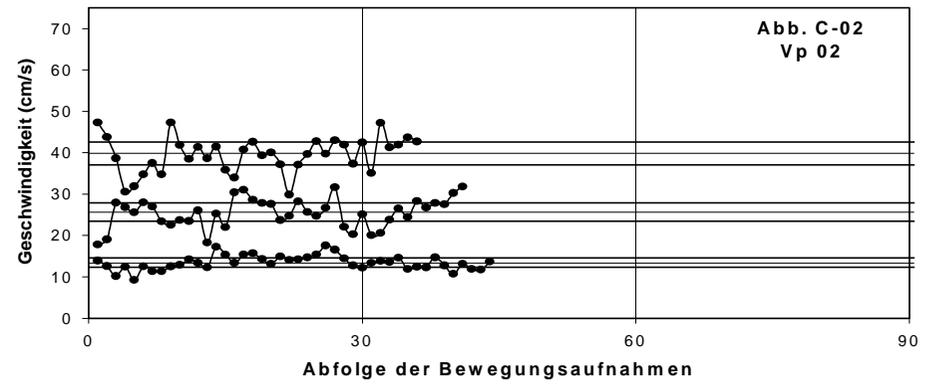
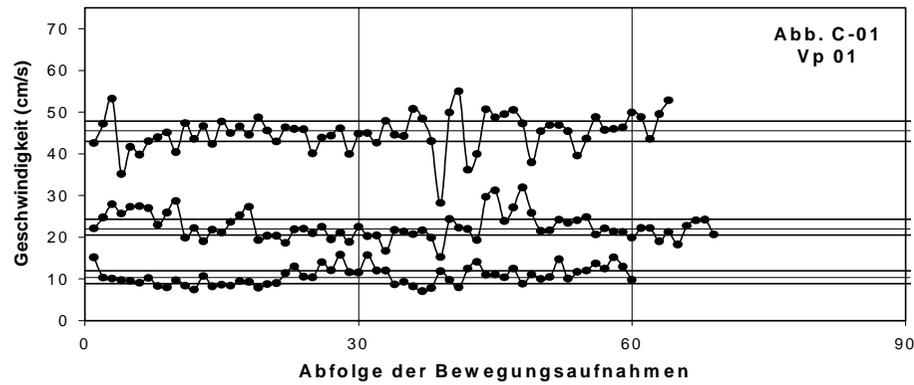
**Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s)**

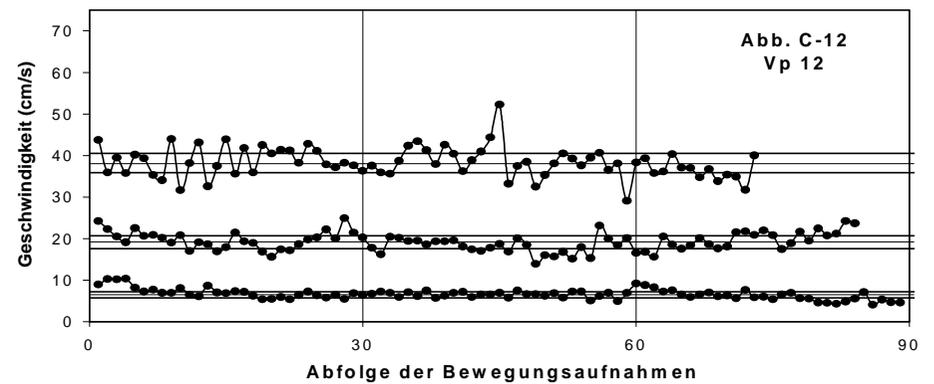
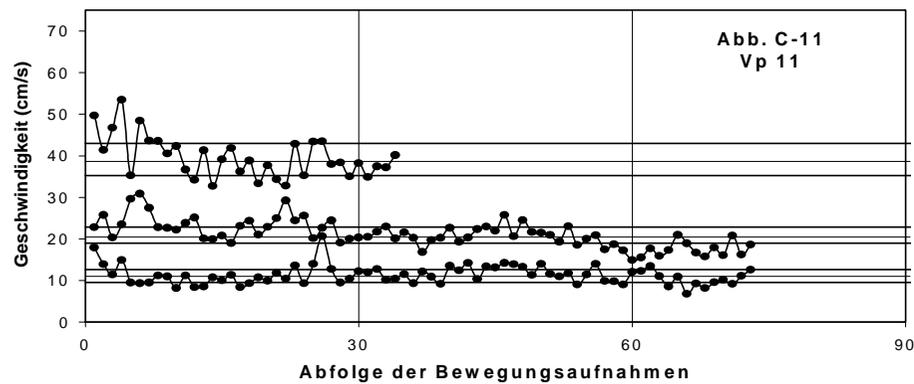
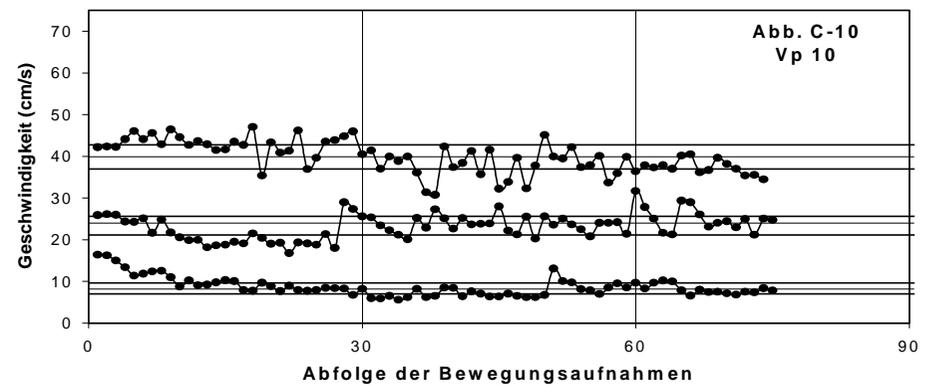
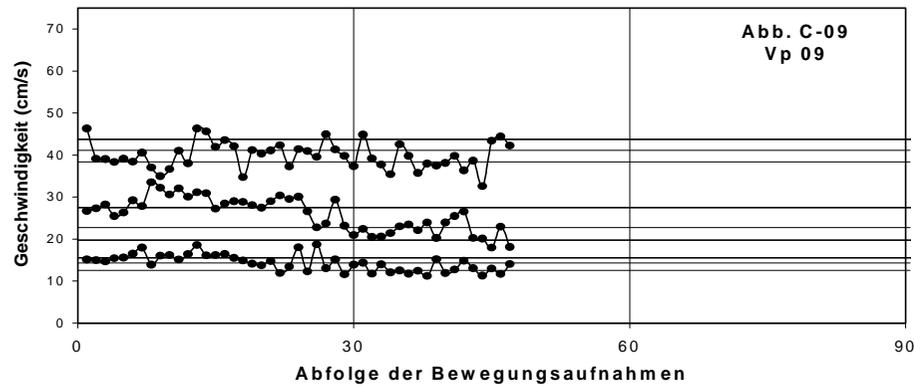
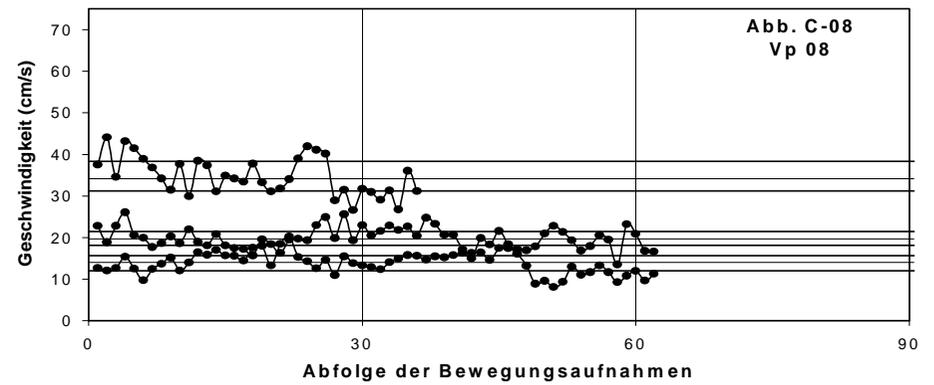
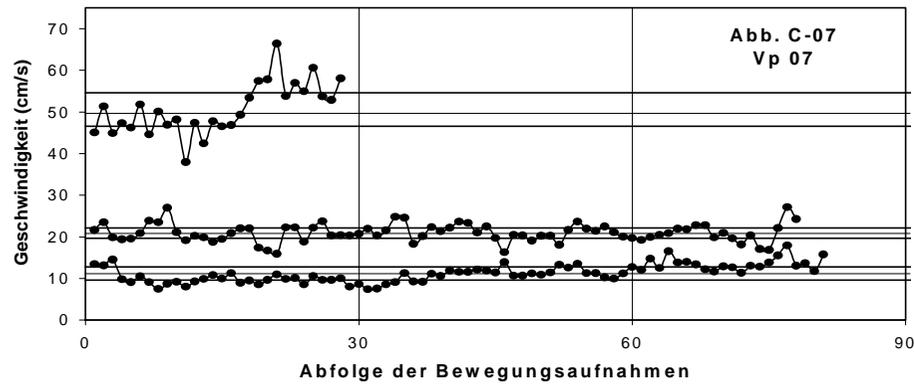
**für die als „gleichschnell“ beurteilten und akzeptierten Bewegungsaufnahmen pro**

- **V<sub>p</sub> (N = 12) und**
- **Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (40 cm/s) ).**

**Waagerechte dünne Linien: individuelle Mediane.**

**Waagerechte dicke Linien: individuelle untere und obere Quartildifferenz-Grenzen.**





## Anhang D

### Experiment 2: Tab. D-01 bis D-09

#### Tab. D-01:

Anzahl der Bewegungsaufnahmen in Abhängigkeit vom Bestimmtheitsmaß pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit.

Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s) Bestimmtheitsmaß					Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s) Bestimmtheitsmaß					Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s) Bestimmtheitsmaß				
	< 0.98	0.98	0.99	1.00		< 0.98	0.98	0.99	1.00		< 0.98	0.98	0.99	1.00
Vp 1	0	10	190	40	Vp 1	5	97	138	5	Vp 1	60	186	54	0
Vp 2	8	32	153	55	Vp 2	41	139	101	0	Vp 2	8	206	34	0
Vp 3	1	0	104	136	Vp 3	1	14	215	11	Vp 3	0	73	166	1
Vp 4	2	32	152	56	Vp 4	1	44	168	28	Vp 4	0	105	134	1
Vp 5	0	9	114	117	Vp 5	5	52	160	28	Vp 5	3	62	156	22
Vp 6	0	39	170	31	Vp 6	4	125	115	0	Vp 6	1	159	81	0
<b>Median</b>	<b>0,5</b>	<b>21,0</b>	<b>152,5</b>	<b>55,5</b>	<b>Median</b>	<b>4,5</b>	<b>74,5</b>	<b>149,0</b>	<b>8,0</b>	<b>Median</b>	<b>2,0</b>	<b>132,0</b>	<b>107,5</b>	<b>0,5</b>

#### Tab. D-02:

Prozentanteil der Urteile („langsamer“ / „schneller“) pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit (240 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit).

Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s) Prozentanteil der Urteile			Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s) Prozentanteil der Urteile			Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s) Prozentanteil der Urteile		
	"langsamer"	"schneller"		"langsamer"	"schneller"		"langsamer"	"schneller"
Vp 1	26,67	73,33	Vp 1	51,25	48,75	Vp 1	56,67	43,33
Vp 2	51,25	48,75	Vp 2	49,58	50,42	Vp 2	27,50	72,50
Vp 3	55,42	44,58	Vp 3	44,58	55,42	Vp 3	47,50	52,50
Vp 4	79,17	20,83	Vp 4	89,17	10,83	Vp 4	97,50	2,50
Vp 5	50,42	49,58	Vp 5	43,33	56,67	Vp 5	57,50	42,50
Vp 6	80,83	19,17	Vp 6	31,67	68,33	Vp 6	23,75	76,25
<b>Median</b>	<b>53,33</b>	<b>46,67</b>	<b>Median</b>	<b>47,08</b>	<b>52,92</b>	<b>Median</b>	<b>52,08</b>	<b>47,92</b>

Zielgeschwindigkeit	"Langsam" (10cm/s)	"Mittelschnell" (20cm/s)	"Schnell" (30cm/s)
Prozentanteil richtiger Urteile			
Vp 1	76,25	67,52	55,00
Vp 2	66,25	55,37	70,00
Vp 3	70,83	66,92	76,25
Vp 4	57,08	34,62	69,58
Vp 5	62,92	50,74	62,92
Vp 6	51,67	56,71	54,58
<b>Median</b>	<b>64,58</b>	<b>62,08</b>	<b>66,25</b>

#### Tab. D-03:

Prozentanteil richtiger Urteile pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit (240 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit).

a) Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	9,58	10,63	11,07	1,48
Vp 02	9,50	10,07	10,68	1,18
Vp 03	9,32	9,99	11,21	1,89
Vp 04	9,61	9,64	9,91	0,30
Vp 05	9,66	10,16	10,74	1,07
Vp 06	9,97	9,99	10,08	0,11
Median	<b>9,60</b>	<b>10,03</b>	<b>10,71</b>	<b>1,13</b>

b) Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	19,73	20,28	20,72	0,99
Vp 02	18,11	19,34	20,37	2,26
Vp 03	17,71	19,55	21,06	3,35
Vp 04	18,46	18,47	19,00	0,54
Vp 05	19,62	19,94	20,04	0,42
Vp 06	19,29	20,01	20,31	1,02
Median	<b>18,87</b>	<b>19,74</b>	<b>20,34</b>	<b>1,00</b>

c) Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	28,69	28,85	29,00	0,31
Vp 02	29,02	31,60	32,34	3,32
Vp 03	26,54	29,47	31,59	5,04
Vp 04	28,45	28,51	31,80	3,35
Vp 05	28,42	29,00	29,98	1,56
Vp 06	28,83	29,77	30,07	1,24
Median	<b>28,57</b>	<b>29,23</b>	<b>30,83</b>	<b>2,44</b>

**Tab. D-04:**

Mediane der Häufigkeitsverteilungen für die einzelnen Urteilkategorien („langsamer“ / „schneller“) sowie

der Häufigkeitsverteilung über alle Bewegungsaufnahmen („langsamer“- und „schneller“-Urteile zusammengefaßt)

pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit.

Letzte Spalte: Individuelle Differenzen (cm/s) zwischen den Medianen der „schneller“- und „langsamer“-Häufigkeitsverteilungen.

**Tab. D-05:**

Quartildifferenzwerte (cm/s) der Gesamtverteilungen („langsamer“ und „schneller“-Urteile zusammengefaßt) pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit.

Innerer Quartilsbereich	Vp 01	Vp 02	Vp 03	Vp 04	Vp 05	Vp 06	Median
Langsam (10cm/s)	1,61	2,11	2,25	2,17	1,85	1,47	<b>2,11</b>
Mittelschnell (20cm/s)	2,91	5,05	5,02	3,37	2,80	3,29	<b>3,37</b>
Schnell (30cm/s)	3,76	5,11	5,78	4,27	3,79	4,83	<b>4,83</b>

**Tab. D-06:**

Kennwerte der psychometrischen Funktionen von Vp 3 pro Zielgeschwindigkeit.

	Zielgeschwindigkeit		
	„Langsam“ (10 cm/s)	„Mittelschnell“ (20 cm/s)	„Schnell“ (30 cm/s)
Lineare Regressionsgleichung	18,264x - 141,55 ( $r^2 = 0,96$ )	10,505x - 151,25 ( $r^2 = 0,96$ )	10,191x - 244,82 ( $r^2 = 0,96$ )
Oberer Schwellenwert	11,86 cm/s	21,54 cm/s	31,38 cm/s
50 % „schneller“-Urteile	10,49 cm/s	19,16 cm/s	28,93 cm/s
Unterer Schwellenwert	9,12 cm/s	16,78 cm/s	26,48 cm/s
Unsicherheitsintervall	2,74 cm/s	4,76 cm/s	4,90 cm/s
<b>Unterschiedsschwelle</b>	<b>1,37 cm/s</b>	<b>2,38 cm/s</b>	<b>2,45 cm/s</b>

	Ziel- geschwindigkeit	Ordinaten- Steigung	Bestimmt- schnittpunkt	Bestimm- heitsmaß
Vp 1	"Langsam" (10cm/s)	20,66	-144,27	0,97
	"Mittel" (20cm/s)	7,81	-110,90	0,92
	"Schnell" (30cm/s)	1,10	13,52	0,21
Vp 2	"Langsam" (10cm/s)	13,59	-88,61	0,93
	"Mittel" (20cm/s)	4,95	-45,25	0,91
	"Schnell" (30cm/s)	4,09	-52,51	0,86
Vp 3	"Langsam" (10cm/s)	18,26	-141,55	0,96
	"Mittel" (20cm/s)	10,51	-151,25	0,96
	"Schnell" (30cm/s)	10,19	-244,82	0,96
Vp 4	"Langsam" (10cm/s)	-0,06	21,17	0,00
	"Mittel" (20cm/s)	1,04	-9,50	0,38
	"Schnell" (30cm/s)	1,12	-30,27	0,73
Vp 5	"Langsam" (10cm/s)	13,98	-94,61	0,90
	"Mittel" (20cm/s)	0,93	38,18	0,12
	"Schnell" (30cm/s)	6,95	-161,88	0,86
Vp 6	"Langsam" (10cm/s)	2,41	-6,06	0,19
	"Mittel" (20cm/s)	3,50	-0,28	0,42
	"Schnell" (30cm/s)	1,93	17,73	0,74
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>13,78</b>	<b>-91,61</b>	<b>0,92</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>4,22</b>	<b>-27,38</b>	<b>0,66</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>3,01</b>	<b>-41,39</b>	<b>0,80</b>

**Tab. D-07:**

Kennwerte der linearen Regression der psychometrischen Funktionen pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit

- „Langsam“ (10 cm/s),
- „Mittelschnell“ (20 cm/s),
- „Schnell“ (30 cm/s).

	Ziel- geschwindigkeit	Ordinaten- Steigung	Bestimmt- schnittpunkt	Bestimm- heitsmaß
Vp 1	"Langsam" (10cm/s)	0,00	10,72	0,00
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	20,63	0,01
	"Schnell" (30cm/s)	-0,01	30,02	0,05
Vp 2	"Langsam" (10cm/s)	0,00	10,32	0,00
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	19,38	0,00
	"Schnell" (30cm/s)	0,01	30,37	0,02
Vp 3	"Langsam" (10cm/s)	-0,01	11,07	0,05
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	19,21	0,01
	"Schnell" (30cm/s)	-0,01	30,20	0,02
Vp 4	"Langsam" (10cm/s)	0,01	8,95	0,06
	"Mittel" (20cm/s)	0,01	17,63	0,04
	"Schnell" (30cm/s)	0,01	27,58	0,04
Vp 5	"Langsam" (10cm/s)	0,00	9,86	0,03
	"Mittel" (20cm/s)	0,00	20,13	0,00
	"Schnell" (30cm/s)	0,00	29,12	0,00
Vp 6	"Langsam" (10cm/s)	0,00	9,92	0,00
	"Mittel" (20cm/s)	-0,01	21,32	0,07
	"Schnell" (30cm/s)	0,01	29,28	0,02
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>0,00</b>	<b>10,12</b>	<b>0,02</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>0,00</b>	<b>19,76</b>	<b>0,01</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>0,00</b>	<b>29,65</b>	<b>0,02</b>

**Tab. D-08:**

Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s) über die 240 Bewegungsaufnahmen pro Vp und Zielgeschwindigkeit (lineare Regressionswerte).

**Tab. D-09:**

Auszahlungsbeträge des Bonussystems (ohne den Grundbetrag in Höhe von 5,- DM) pro Vp (N=6) und Zielgeschwindigkeit.

	Bonus ohne Grundbetrag			Gesamt- Bonus
	Zielgeschwindigkeit			
	"Langsam" (10cm/s)	"Mittelschnell" (20cm/s)	"Schnell" (30cm/s)	
Vp 01	4,44 DM	5,15 DM	5,52 DM	15,11 DM
Vp 02	3,58 DM	2,84 DM	3,77 DM	10,19 DM
Vp 03	3,28 DM	3,32 DM	4,11 DM	10,71 DM
Vp 04	3,21 DM	3,76 DM	4,60 DM	11,57 DM
Vp 05	4,05 DM	4,81 DM	5,53 DM	14,39 DM
Vp 06	4,73 DM	4,83 DM	4,61 DM	14,17 DM
<b>Median</b>	<b>3,82 DM</b>	<b>4,29 DM</b>	<b>4,61 DM</b>	<b>12,87 DM</b>

## **Anhang E**

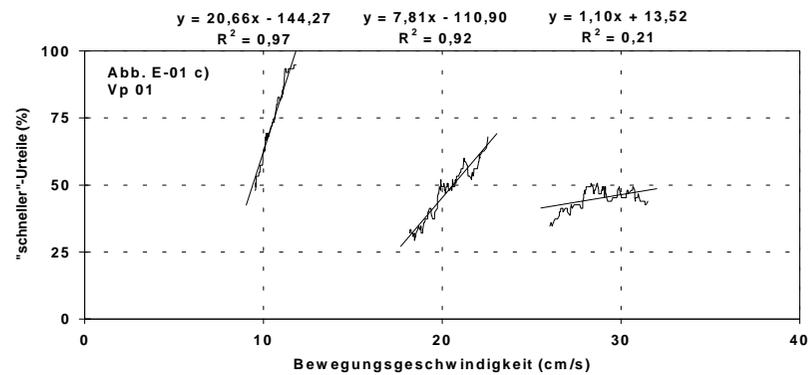
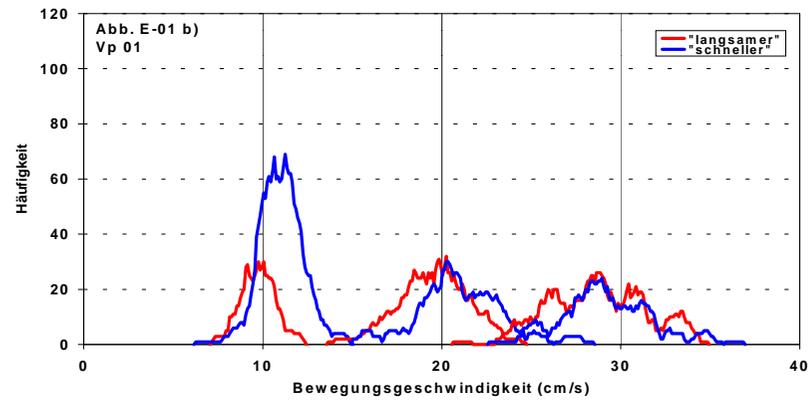
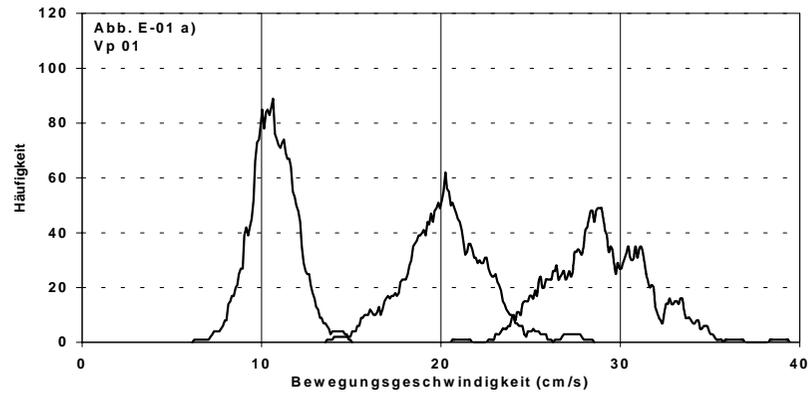
### **Experiment 2: Abb. E-01 - E-06**

---

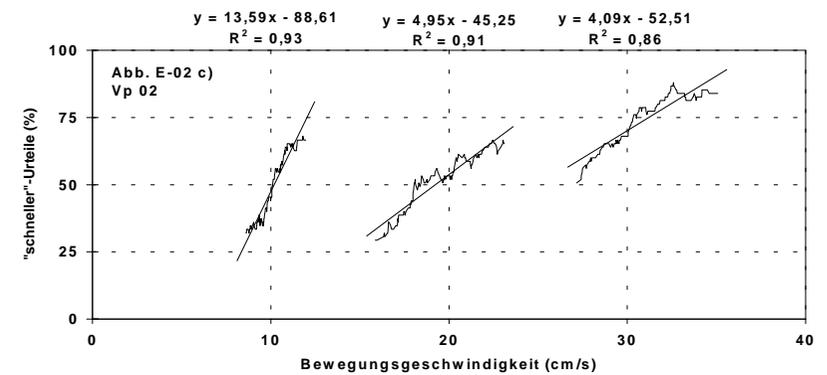
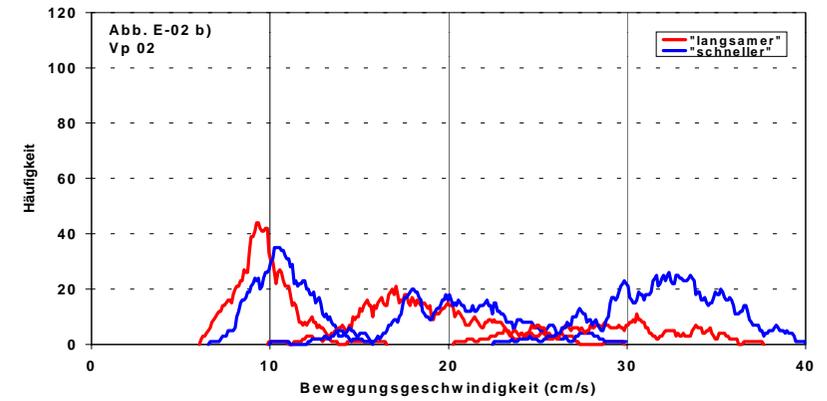
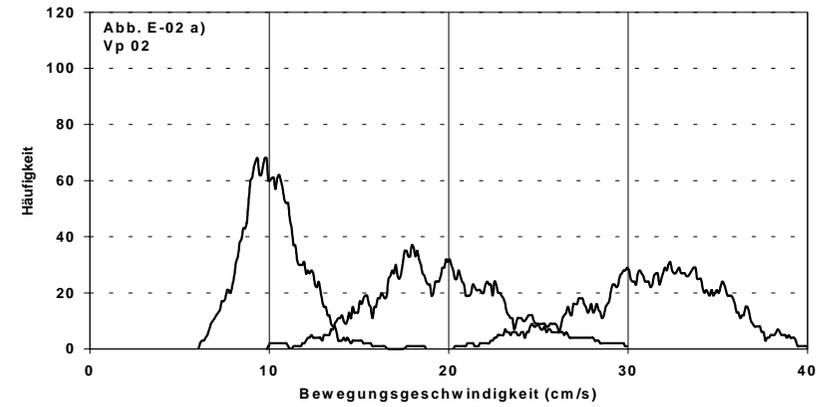
Häufigkeitsverteilungen und psychometrische Funktionen pro

- $V_p$  (N=6) und
  - Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s) )
- a) Individuelle Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s), dargestellt mit der Methode gleitender Mediane (Median je 1 cm/s Intervall der in einer Rangreihe angeordneten Werte der Bewegungsgeschwindigkeiten in 0,1 cm/s-Schritten);
  - b) Individuelle Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten, getrennt nach Urteilkategorien („langsamer“ (rote Linienzüge) / „schneller“ (blaue Linienzüge) );
  - c) Individuelle psychometrische Funktionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen für die drei Zielgeschwindigkeiten: Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit, dargestellt mit der Methode gleitender Mediane (Median je 75 der in einer Rangreihe angeordneten Werte der Bewegungsgeschwindigkeiten mit einer Schrittweite von einem Datenpunkt).

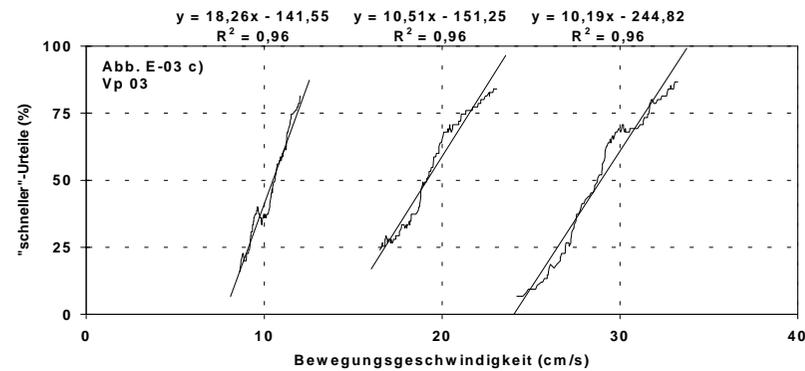
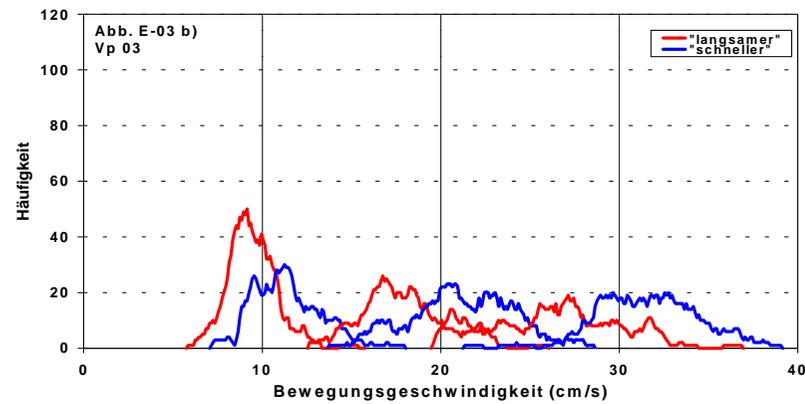
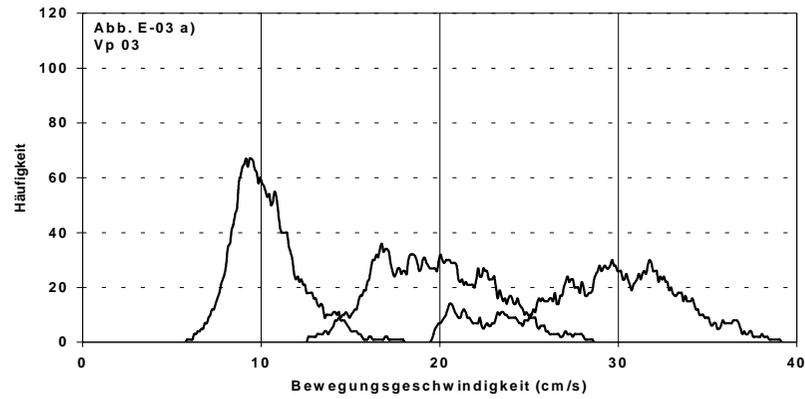
Vp 01



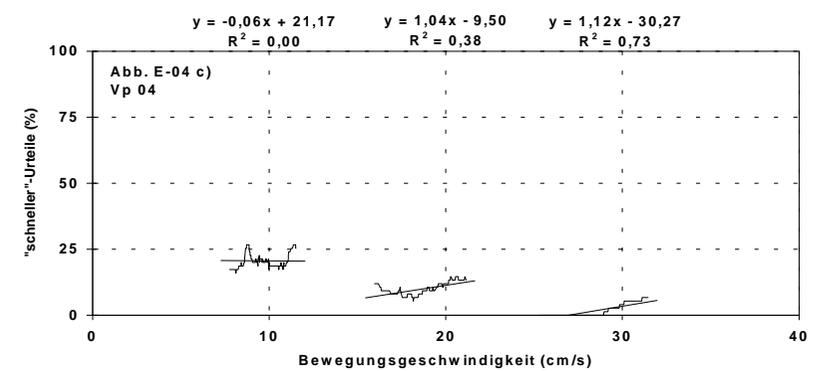
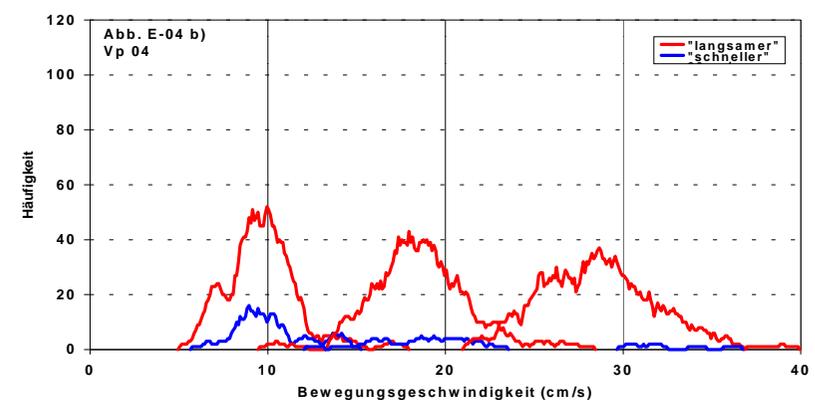
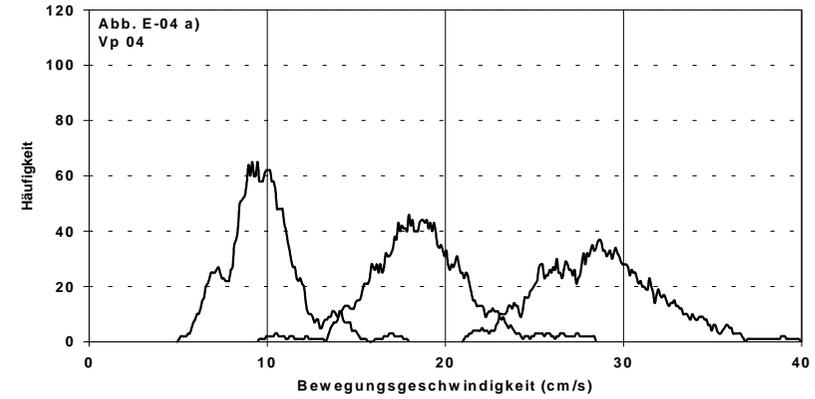
Vp 02



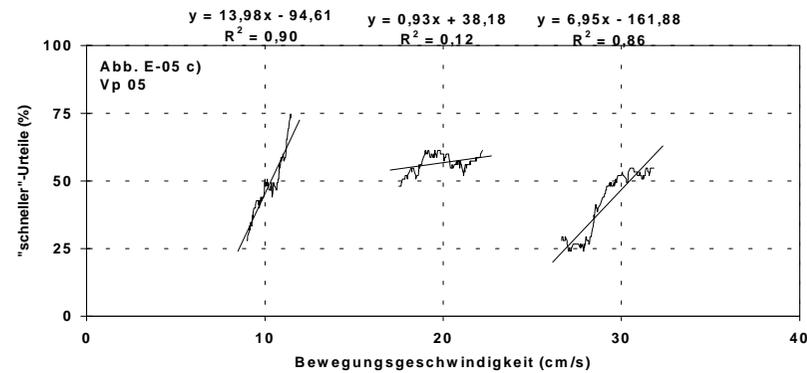
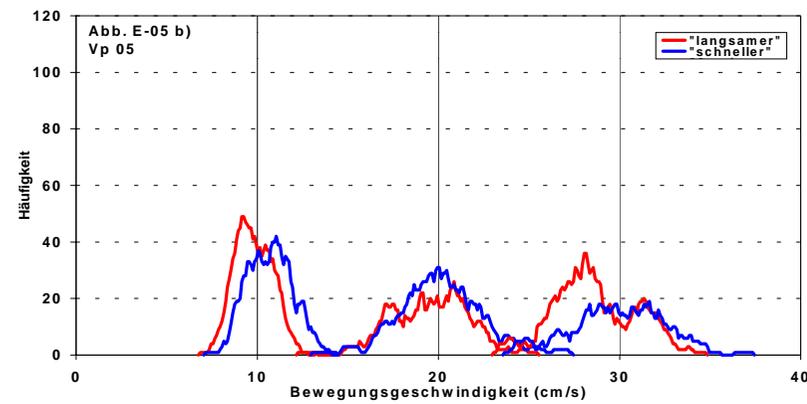
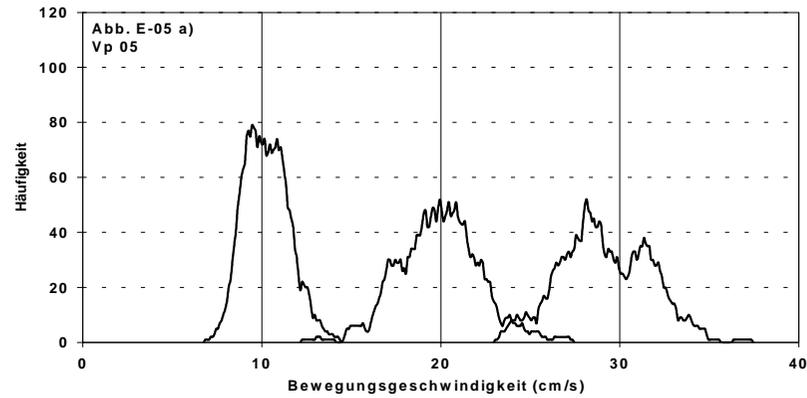
Vp 03



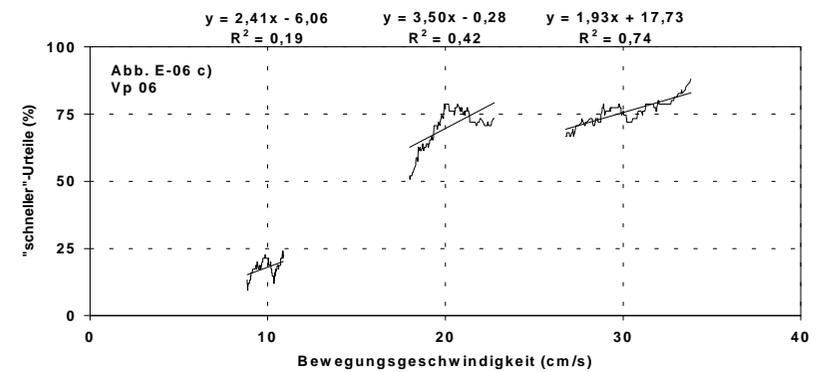
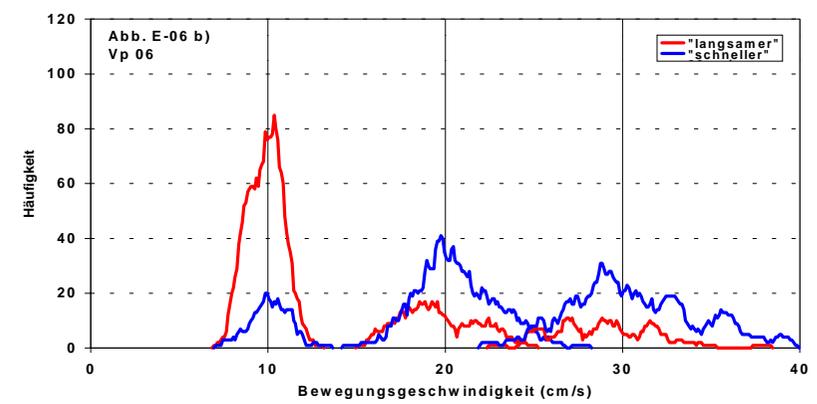
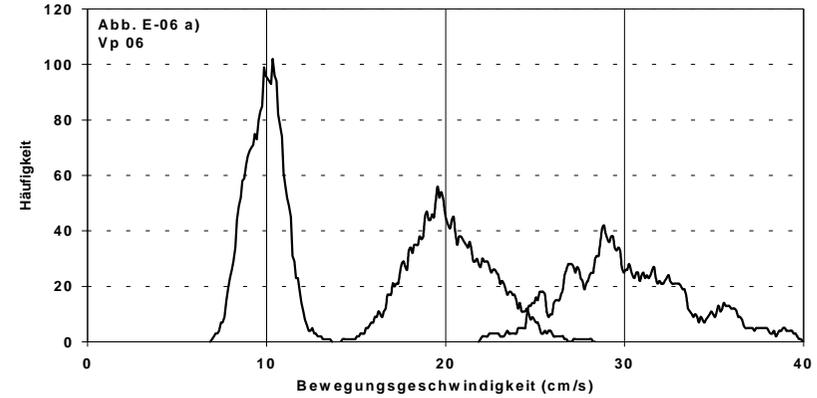
Vp 04



Vp 05



Vp 06



## Anhang F

### Experiment 3: Tab. F-01 bis F-16

**Tab. F-01:**

Anzahl der Bewegungsaufnahmen pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der zurückgelegten Strecke über die Zeit.

Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s)					Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s)					Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s)				
	Bestimmtheitsmaß					Bestimmtheitsmaß					Bestimmtheitsmaß			
	< 0.98	0.98	0.99	1.00		< 0.98	0.98	0.99	1.00		< 0.98	0.98	0.99	1.00
Vp 1	10	84	366	25	Vp 1	44	245	229	1	Vp 1	33	309	166	0
Vp 2	12	58	327	90	Vp 2	4	216	259	0	Vp 2	24	362	113	0
Vp 3	17	62	344	69	Vp 3	5	67	406	2	Vp 3	18	204	270	1
Vp 4	7	70	372	33	Vp 4	16	225	250	0	Vp 4	6	385	90	0
Vp 5	0	0	246	229	Vp 5	0	7	451	17	Vp 5	1	16	457	2
Vp 6	16	48	281	146	Vp 6	11	145	324	6	Vp 6	7	164	310	1
Vp 7	7	26	400	49	Vp 7	14	354	121	0	Vp 7	48	448	27	0
Vp 8	10	97	370	8	Vp 8	7	189	286	0	Vp 8	63	256	219	0
Vp 9	1	20	271	184	Vp 9	1	96	377	2	Vp 9	2	195	280	0
Vp 10	58	122	313	40	Vp 10	30	273	201	1	Vp 10	7	300	175	0
Vp 11	4	22	299	154	Vp 11	1	17	363	95	Vp 11	2	91	382	1
Vp 12	13	65	372	38	Vp 12	8	122	344	9	Vp 12	6	193	278	4
Median	10,0	60,0	335,5	59,0	Median	7,5	167,0	305,0	1,5	Median	7,0	230,0	244,5	0,0

**Tab.: F-02:**

Prozentanteil der Urteile („langsamer“ / „schneller“) pro Vp (N = 12) und Zielgeschwindigkeit. **Fett markiert: Überschreitung des Kriteriumswertes (max. 60 %) und Verlust des doppelten Bonus.**

Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s)			Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s)			Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s)		
	Prozentanteil der Urteile			Prozentanteil der Urteile			Prozentanteil der Urteile	
	"langsamer"	"schneller"		"langsamer"	"schneller"		"langsamer"	"schneller"
Vp 1	49,47	50,53	Vp 1	44,21	55,79	Vp 1	57,26	42,74
Vp 2	52,63	47,37	Vp 2	42,53	57,47	Vp 2	45,89	54,11
Vp 3	50,11	49,89	Vp 3	54,11	45,89	Vp 3	52,63	47,37
Vp 4	49,89	50,11	Vp 4	49,89	50,11	Vp 4	46,32	53,68
Vp 5	58,74	41,26	Vp 5	55,58	44,42	Vp 5	51,79	48,21
Vp 6	<b>60,21</b>	39,79	Vp 6	50,95	49,05	Vp 6	51,16	48,84
Vp 7	50,11	49,89	Vp 7	50,11	49,89	Vp 7	58,74	41,26
Vp 8	41,26	58,74	Vp 8	<b>67,16</b>	32,84	Vp 8	45,26	54,74
Vp 9	48,84	51,16	Vp 9	47,79	52,21	Vp 9	43,37	56,63
Vp 10	53,68	46,32	Vp 10	59,16	40,84	Vp 10	53,26	46,74
Vp 11	46,11	53,89	Vp 11	39,16	<b>60,84</b>	Vp 11	46,11	53,89
Vp 12	51,58	48,42	Vp 12	50,74	49,26	Vp 12	55,58	44,42
Median	50,11	49,89	Median	50,42	49,58	Median	51,47	48,53

Zielgeschwindigkeit	"Langsam"	"Mittelschnell"	"Schnell"
	(10cm/s)	(20cm/s)	(30cm/s)
Prozentanteil richtiger Urteile			
Vp 1	71,58	73,47	80,63
Vp 2	69,68	71,16	69,47
Vp 3	67,58	68,63	67,79
Vp 4	73,05	73,47	70,74
Vp 5	77,89	80,63	75,58
Vp 6	76,00	78,74	78,11
Vp 7	72,42	71,16	72,42
Vp 8	70,53	83,58	71,79
Vp 9	66,11	72,42	70,32
Vp 10	72,84	69,89	73,89
Vp 11	71,58	72,00	<b>65,26</b>
Vp 12	77,05	67,16	69,89
<b>Median</b>	<b>72,00</b>	<b>72,21</b>	<b>71,26</b>

**Tab. F-03:**  
Prozentanteil richtiger Urteile pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit.

(Fett markiert: Unterschreitung des Kriteriumswertes (mind. 66 % richtige Urteile) und Verlust des doppelten Bonus (Vp 11)).

a) Zielgeschwindigkeit "Langsam" (10cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	8,87	9,80	10,67	1,80
Vp 02	9,37	10,03	10,62	1,25
Vp 03	9,77	10,20	10,56	0,79
Vp 04	9,46	10,20	10,75	1,28
Vp 05	9,33	10,14	11,69	2,36
Vp 06	9,27	10,04	11,46	2,19
Vp 07	9,41	9,90	10,44	1,03
Vp 08	9,52	10,14	10,59	1,07
Vp 09	9,58	10,05	10,57	0,99
Vp 10	9,12	9,66	10,59	1,47
Vp 11	8,87	9,80	10,67	1,80
Vp 12	8,96	9,76	10,62	1,66
<b>Median</b>	<b>9,35</b>	<b>10,04</b>	<b>10,62</b>	<b>1,37</b>

b) Zielgeschwindigkeit "Mittelschnell" (20cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	18,41	19,94	20,79	2,39
Vp 02	18,82	19,81	20,70	1,88
Vp 03	19,85	20,54	21,49	1,64
Vp 04	19,05	20,38	21,54	2,49
Vp 05	16,79	18,82	21,29	4,49
Vp 06	17,91	19,45	21,18	3,27
Vp 07	18,87	19,73	20,74	1,87
Vp 08	18,18	19,64	21,18	3,00
Vp 09	18,88	19,98	21,07	2,19
Vp 10	17,97	18,81	19,68	1,71
Vp 11	18,97	20,51	21,43	2,47
Vp 12	18,63	19,40	20,28	1,65
<b>Median</b>	<b>18,73</b>	<b>19,77</b>	<b>21,12</b>	<b>2,29</b>

c) Zielgeschwindigkeit "Schnell" (30cm/s)				Differenz
Urteile	"langsamer"	Gesamt	Urteile "schneller"	"schneller" -
				"langsamer"
Vp 01	27,52	29,03	31,57	4,05
Vp 02	28,03	29,28	30,55	2,52
Vp 03	28,13	29,21	29,96	1,82
Vp 04	27,41	29,30	30,85	3,43
Vp 05	27,37	29,44	31,24	3,86
Vp 06	26,53	28,60	31,38	4,84
Vp 07	28,52	29,43	30,82	2,31
Vp 08	27,77	29,38	31,08	3,31
Vp 09	29,10	30,13	30,96	1,86
Vp 10	27,93	29,32	30,76	2,84
Vp 11	28,37	29,65	30,74	2,37
Vp 12	27,19	28,78	30,31	3,11
<b>Median</b>	<b>27,85</b>	<b>29,31</b>	<b>30,84</b>	<b>2,98</b>

**Tab. F-04:**  
Mediane (cm/s) pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit

- der nach Urteilkategorien („langsamer“ / „schneller“) aufgeteilten Häufigkeitsverteilungen,
- der Gesamtverteilung („langsamer“ und „schneller“-Urteile zusammengefaßt)
- sowie der Differenz zwischen den Medianen der „schneller“ und „langsamer“-Urteilsverteilungen.

**Tab. F-05:**  
**Quartildifferenzwerte der Gesamtver-**  
**teilungen („langsamer“- und „schneller“-**  
**Urteile zusammengefaßt) pro Vp (N=12) und**  
**Zielgeschwindigkeit.**

	Zielgeschwindigkeit		
	"Langsam" (10cm/s)	"Mittelschnell" (20cm/s)	"Schnell" (30cm/s)
Vp 01	2,43	2,92	4,30
Vp 02	1,94	2,63	3,24
Vp 03	1,26	2,27	2,75
Vp 04	1,76	2,88	4,20
Vp 05	2,36	4,71	4,47
Vp 06	2,49	3,70	5,59
Vp 07	1,35	2,54	3,13
Vp 08	1,57	3,25	4,34
Vp 09	1,62	2,85	3,33
Vp 10	1,93	2,35	3,87
Vp 11	2,43	3,50	3,98
Vp 12	2,02	2,80	4,44
<b>Median</b>	<b>1,94</b>	<b>2,87</b>	<b>4,09</b>

**Tab.F-06:**  
**Unterschiedsschwellen in cm/s pro Vp (N=12) und**  
**Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s), „Mittel-**  
**schnell“ (20 cm/s), „Schnell“ (30 cm/s) ).**

	Zielgeschwindigkeiten		
	"Langsam" (10cm/s)	"Mittelschnell" (20cm/s)	"Schnell" (30cm/s)
Vp 01	1,65	1,82	2,02
Vp 02	1,42	1,69	2,07
Vp 03	1,03	1,53	1,93
Vp 04	1,15	1,67	2,44
Vp 05	1,16	1,92	2,36
Vp 06	1,28	1,75	2,60
Vp 07	0,81	1,62	2,01
Vp 08	1,11	1,28	2,36
Vp 09	1,24	1,55	2,51
Vp 10	1,11	1,73	2,29
Vp 11	1,65	2,44	3,47
Vp 12	0,98	2,28	2,80
<b>Median</b>	<b>1,15</b>	<b>1,71</b>	<b>2,36</b>

**Tab. F-07:**  
**Weber-Quotienten pro Vp (N=12) und Zielgeschwin-**  
**digkeit.**

	Zielgeschwindigkeiten		
	"Langsam" (10cm/s)	"Mittelschnell" (20cm/s)	"Schnell" (30cm/s)
Vp 01	0,165	0,091	0,067
Vp 02	0,142	0,085	0,069
Vp 03	0,103	0,076	0,064
Vp 04	0,115	0,084	0,081
Vp 05	0,116	0,096	0,079
Vp 06	0,128	0,088	0,087
Vp 07	0,081	0,081	0,067
Vp 08	0,111	0,064	0,079
Vp 09	0,124	0,077	0,084
Vp 10	0,111	0,087	0,076
Vp 11	0,165	0,122	0,116
Vp 12	0,098	0,114	0,093
<b>Median</b>	<b>0,115</b>	<b>0,086</b>	<b>0,079</b>

**Tab. F-08:**

**Unterschiedsschwellen in Grad/Sekunde pro Vp (N=12). Zusätzliche Angaben: Geschlecht sowie (in Abhängigkeit von der Unterarmlänge) Abstand in cm zwischen Mittelpunkt Kugellager der Ellbogenstütze und Aufnahmeelement.**

		Unterschiedsschwellen in cm/s							
		männl. weibl.	Abstand cm	Zielgeschwin- digkeit %/s	Unterschieds- schwelle %/s	Zielgeschwin- digkeit %/s	Unterschieds- schwelle %/s	Zielgeschwin- digkeit %/s	Unterschieds- schwelle %/s
		"Langsam" (10cm/s)			"Mittelschnell" (20cm/s)		"Schnell" (30cm/s)		
Vp 01	männl.		41,0	13,97	1,79	27,95	2,45	41,92	3,63
Vp 02	männl.		34,1	16,80	1,93	33,60	2,81	50,41	4,09
Vp 03	männl.		39,4	14,54	1,49	29,08	2,22	43,63	2,81
Vp 04	weibl.		36,2	15,83	2,24	31,66	2,68	47,48	3,28
Vp 05	männl.		41,3	13,87	2,28	27,75	2,52	41,62	2,81
Vp 06	weibl.		35,9	15,96	1,85	31,92	3,07	47,88	3,77
Vp 07	weibl.		35,0	16,37	1,82	32,74	2,84	49,11	3,75
Vp 08	männl.		41,5	13,81	1,36	27,61	3,14	41,42	3,87
Vp 09	weibl.		38,5	14,88	1,85	29,76	2,30	44,65	3,74
Vp 10	weibl.		41,5	13,81	1,53	27,61	1,77	41,42	3,25
Vp 11	weibl.		37,5	15,28	2,52	30,56	3,72	45,84	5,31
Vp 12	männl.		42,5	13,48	1,09	26,96	2,18	40,44	2,71
<b>Median</b>			<b>39,0</b>	<b>14,71</b>	<b>1,84</b>	<b>29,42</b>	<b>2,60</b>	<b>44,14</b>	<b>3,69</b>

**Tab. F-09:**

**Steigung der psychometrischen Funktion (Steigungsmaß der linearen Regression): Prozentuale Zunahme der „schneller“-Urteile pro Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit in cm/s. Die Berechnung erfolgte jeweils getrennt für die erste und zweite Hälfte der Bewegungsaufnahmen als auch für die gesamte Anzahl an Bewegungsaufnahmen pro Vp (N = 12) und Zielgeschwindigkeit.**

	Zielgeschwindigkeit a) "Langsam" (10cm/s)			Zielgeschwindigkeit b) "Mittelschnell" (20cm/s)			Zielgeschwindigkeit c) "Schnell" (30cm/s)		
	1.Hälfte	2.Hälfte	1.+2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.+2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.+2.Hälfte
Vp 01	16,92	17,23	15,18	13,58	17,04	13,74	14,03	11,81	12,36
Vp 02	18,58	19,85	17,63	13,54	17,48	14,75	15,19	9,63	12,08
Vp 03	23,89	23,24	24,33	15,26	17,36	16,35	14,56	14,50	12,96
Vp 04	19,24	27,57	21,81	17,92	15,33	14,96	10,40	12,16	10,26
Vp 05	27,29	20,33	21,56	14,37	13,51	13,00	13,64	10,41	10,58
Vp 06	20,23	21,56	19,48	14,83	18,84	14,25	10,10	10,83	9,62
Vp 07	33,42	32,83	30,92	16,52	14,56	15,43	12,59	13,18	12,44
Vp 08	19,04	29,67	22,51	12,12	9,56	19,53	11,25	10,28	10,61
Vp 09	23,99	15,86	20,10	18,70	17,06	16,15	8,20	13,08	9,95
Vp 10	21,54	25,86	22,47	16,46	12,99	14,44	12,37	10,53	10,91
Vp 11	15,96	22,51	15,18	12,13	10,01	10,26	5,09	9,18	7,20
Vp 12	24,35	30,85	25,46	9,99	12,58	10,98	10,36	9,10	8,93
<b>Median</b>	<b>20,88</b>	<b>22,88</b>	<b>21,69</b>	<b>14,60</b>	<b>14,95</b>	<b>14,59</b>	<b>11,81</b>	<b>10,68</b>	<b>10,60</b>

	Ziel- geschwindigkeit	Steigung	Ordinaten- schnittpunkt	Bestimmt- heitsmaß
Vp 1	"Langsam" (10cm/s)	-0,002	10,216	0,012
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	19,955	0,003
	"Schnell" (30cm/s)	-0,003	30,071	0,022
Vp 2	"Langsam" (10cm/s)	0,001	9,658	0,016
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	19,958	0,001
	"Schnell" (30cm/s)	-0,001	29,678	0,003
Vp 3	"Langsam" (10cm/s)	0,001	9,996	0,015
	"Mittel" (20cm/s)	-0,002	21,056	0,013
	"Schnell" (30cm/s)	-0,003	29,971	0,049
Vp 4	"Langsam" (10cm/s)	0,001	10,030	0,007
	"Mittel" (20cm/s)	0,001	20,208	0,002
	"Schnell" (30cm/s)	0,002	28,828	0,007
Vp 5	"Langsam" (10cm/s)	0,002	9,816	0,026
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	18,921	0,000
	"Schnell" (30cm/s)	-0,001	29,552	0,003
Vp 6	"Langsam" (10cm/s)	0,001	10,093	0,002
	"Mittel" (20cm/s)	-0,003	20,184	0,017
	"Schnell" (30cm/s)	0,001	28,640	0,001
Vp 7	"Langsam" (10cm/s)	0,000	9,973	0,000
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	20,016	0,005
	"Schnell" (30cm/s)	0,002	29,138	0,008
Vp 8	"Langsam" (10cm/s)	0,000	10,187	0,000
	"Mittel" (20cm/s)	-0,003	19,696	0,037
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	29,532	0,000
Vp 9	"Langsam" (10cm/s)	0,001	9,875	0,011
	"Mittel" (20cm/s)	0,002	19,519	0,025
	"Schnell" (30cm/s)	0,001	29,894	0,007
Vp10	"Langsam" (10cm/s)	0,000	9,858	0,001
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	18,910	0,004
	"Schnell" (30cm/s)	0,003	28,514	0,023
Vp11	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	10,294	0,007
	"Mittel" (20cm/s)	0,005	19,332	0,075
	"Schnell" (30cm/s)	0,002	29,191	0,011
Vp12	"Langsam" (10cm/s)	0,001	9,573	0,005
	"Mittel" (20cm/s)	0,002	18,958	0,021
	"Schnell" (30cm/s)	0,001	28,298	0,003
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>0,001</b>	<b>9,984</b>	<b>0,007</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>-0,001</b>	<b>19,956</b>	<b>0,009</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>0,001</b>	<b>29,361</b>	<b>0,007</b>

**Tab. F-10:**  
Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s) über die 475 Bewegungsaufnahmen pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit (lineare Regressionswerte).

**Tab. F-11:**  
Verlauf der Dauer in Sekunden über die 475 Bewegungsaufnahmen. Lineare Regressionswerte.

	Ziel- geschwindigkeit	Steigung	Ordinaten- schnittpunkt	Bestimmt- heitsmaß
Vp 01	"Langsam" (10cm/s)	0,000	0,740	0,217
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,469	0,382
	"Schnell" (30cm/s)	-0,001	0,641	0,647
Vp 02	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	1,096	0,420
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	0,611	0,687
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,362	0,007
Vp 03	"Langsam" (10cm/s)	-0,002	1,747	0,626
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	1,019	0,800
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,478	0,490
Vp 04	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	0,853	0,414
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,487	0,022
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,403	0,494
Vp 05	"Langsam" (10cm/s)	-0,002	1,664	0,418
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	1,059	0,350
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,747	0,414
Vp 06	"Langsam" (10cm/s)	0,001	2,028	0,053
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	0,878	0,535
	"Schnell" (30cm/s)	-0,001	0,874	0,675
Vp 07	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	1,205	0,642
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,363	0,317
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,291	0,350
Vp 08	"Langsam" (10cm/s)	0,000	0,730	0,019
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,695	0,256
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,221	0,246
Vp 09	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	1,308	0,332
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,802	0,224
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,520	0,111
Vp10	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	0,817	0,440
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,562	0,340
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,486	0,662
Vp11	"Langsam" (10cm/s)	0,003	0,736	0,562
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	1,320	0,203
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,913	0,007
Vp12	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	1,275	0,268
	"Mittel" (20cm/s)	0,000	0,968	0,270
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	0,635	0,196
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>-0,001</b>	<b>1,150</b>	<b>0,416</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>0,000</b>	<b>0,840</b>	<b>0,334</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>0,000</b>	<b>0,503</b>	<b>0,382</b>

**Tab. F-12:**  
Verlauf der Strecke in Zentimeter über die 475 Bewegungsaufnahmen. Lineare Regressionswerte.

	Ziel- geschwindigkeit	Steigung	Ordinaten- schnittpunkt	Bestimmt- heitsmaß
Vp 01	"Langsam" (10cm/s)	-0,005	6,586	0,319
	"Mittel" (20cm/s)	-0,007	8,217	0,445
	"Schnell" (30cm/s)	-0,015	16,076	0,727
Vp 02	"Langsam" (10cm/s)	-0,006	9,506	0,559
	"Mittel" (20cm/s)	-0,014	10,296	0,752
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	9,043	0,001
Vp 03	"Langsam" (10cm/s)	-0,017	15,794	0,665
	"Mittel" (20cm/s)	-0,023	18,385	0,874
	"Schnell" (30cm/s)	-0,012	12,349	0,593
Vp 04	"Langsam" (10cm/s)	-0,005	7,466	0,461
	"Mittel" (20cm/s)	-0,001	8,299	0,019
	"Schnell" (30cm/s)	-0,006	9,699	0,468
Vp 05	"Langsam" (10cm/s)	-0,013	14,481	0,397
	"Mittel" (20cm/s)	-0,012	17,186	0,397
	"Schnell" (30cm/s)	-0,013	18,799	0,494
Vp 06	"Langsam" (10cm/s)	0,008	17,590	0,336
	"Mittel" (20cm/s)	-0,016	14,756	0,851
	"Schnell" (30cm/s)	-0,025	20,820	0,853
Vp 07	"Langsam" (10cm/s)	-0,012	10,596	0,709
	"Mittel" (20cm/s)	-0,003	6,149	0,351
	"Schnell" (30cm/s)	0,005	7,133	0,347
Vp 08	"Langsam" (10cm/s)	-0,001	6,423	0,024
	"Mittel" (20cm/s)	-0,008	11,494	0,328
	"Schnell" (30cm/s)	0,006	5,741	0,218
Vp 09	"Langsam" (10cm/s)	-0,005	11,576	0,345
	"Mittel" (20cm/s)	-0,006	13,276	0,241
	"Schnell" (30cm/s)	0,005	13,101	0,191
Vp10	"Langsam" (10cm/s)	-0,005	7,006	0,499
	"Mittel" (20cm/s)	-0,005	8,963	0,416
	"Schnell" (30cm/s)	-0,011	11,673	0,614
Vp11	"Langsam" (10cm/s)	0,022	6,584	0,586
	"Mittel" (20cm/s)	-0,005	22,400	0,112
	"Schnell" (30cm/s)	0,000	22,593	0,000
Vp12	"Langsam" (10cm/s)	-0,007	10,712	0,346
	"Mittel" (20cm/s)	-0,006	15,708	0,233
	"Schnell" (30cm/s)	-0,007	15,351	0,302
<b>Median</b>	"Langsam" (10cm/s)	<b>-0,005</b>	<b>10,051</b>	<b>0,429</b>
	"Mittel" (20cm/s)	<b>-0,007</b>	<b>14,016</b>	<b>0,374</b>
	"Schnell" (30cm/s)	<b>-0,006</b>	<b>12,725</b>	<b>0,408</b>

**Tab. F-13:**

a) Mittlere Strecke in Zentimeter, b) Mittlere Dauer in Sekunden. Mediane pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit.

Strecke (cm)													
Median	Vp 01	Vp 02	Vp 03	Vp 04	Vp 05	Vp 06	Vp 07	Vp 08	Vp 09	Vp 10	Vp 11	Vp 12	Median
Langsam (10)	5,14	7,99	12,41	6,03	10,70	19,39	7,00	6,25	10,47	5,86	11,46	9,18	10,467
Mittel (20cm/)	6,17	6,07	12,36	7,97	13,99	10,61	5,25	9,96	11,67	7,69	21,16	14,32	10,611
Schnell (30cr)	12,58	9,04	8,98	8,26	15,38	14,12	8,35	7,01	14,17	8,64	22,70	13,56	8,978

Dauer (s)													
Median	Vp 01	Vp 02	Vp 03	Vp 04	Vp 05	Vp 06	Vp 07	Vp 08	Vp 09	Vp 10	Vp 11	Vp 12	Median
Langsam (10)	0,62	0,89	1,33	0,68	1,17	2,18	0,82	0,71	1,16	0,67	1,31	1,08	1,160
Mittel (20cm/)	0,36	0,36	0,70	0,47	0,87	0,65	0,31	0,60	0,69	0,49	1,18	0,85	0,650
Schnell (30cr)	0,48	0,36	0,36	0,34	0,62	0,59	0,34	0,27	0,56	0,35	0,89	0,56	0,360

**Tab. F-14:**

Auszahlungsbeträge des erweiterten Bonussystems in DM a) ohne Berücksichtigung des doppelten Bonus, b) mit Berücksichtigung des doppelten Bonus pro Vp (N=12) und Zielgeschwindigkeit. Fett markiert: Verlust des doppelten Bonus.

a) Bonus ohne Verdoppelung	Zielgeschwindigkeit			Gesamt-Bonus	b) Bonus nach evtl. Verdoppelung	Zielgeschwindigkeit			Gesamt-Bonus
	"Langsam"	Mittelschnel	"Schnell"			"Langsam"	Mittelschnel	"Schnell"	
	(10cm/s)	(20cm/s)	(30cm/s)			(10cm/s)	(20cm/s)	(30cm/s)	
Vp 01	6,72 DM	10,20 DM	10,32 DM	27,24 DM	Vp 01	13,44 DM	20,40 DM	20,64 DM	54,48 DM
Vp 02	7,98 DM	11,44 DM	12,76 DM	32,18 DM	Vp 02	15,96 DM	22,88 DM	25,52 DM	64,36 DM
Vp 03	11,28 DM	12,59 DM	13,41 DM	37,28 DM	Vp 03	22,56 DM	25,18 DM	26,82 DM	74,56 DM
Vp 04	8,71 DM	10,04 DM	10,53 DM	29,28 DM	Vp 04	17,42 DM	20,08 DM	21,06 DM	58,56 DM
Vp 05	6,84 DM	6,01 DM	10,26 DM	23,11 DM	Vp 05	13,68 DM	12,02 DM	20,52 DM	46,22 DM
Vp 06	6,56 DM	7,79 DM	7,83 DM	22,18 DM	Vp 06	<b>6,56 DM</b>	15,58 DM	15,66 DM	37,80 DM
Vp 07	10,88 DM	11,40 DM	13,20 DM	35,48 DM	Vp 07	21,76 DM	22,80 DM	26,40 DM	70,96 DM
Vp 08	9,56 DM	10,01 DM	10,15 DM	29,72 DM	Vp 08	19,12 DM	<b>10,01 DM</b>	20,30 DM	49,43 DM
Vp 09	8,94 DM	10,83 DM	13,01 DM	32,78 DM	Vp 09	17,88 DM	21,66 DM	26,02 DM	65,56 DM
Vp 10	7,59 DM	9,32 DM	11,41 DM	28,32 DM	Vp 10	15,18 DM	18,64 DM	22,82 DM	56,64 DM
Vp 11	6,72 DM	8,73 DM	10,83 DM	26,28 DM	Vp 11	13,44 DM	<b>8,73 DM</b>	<b>10,83 DM</b>	33,00 DM
Vp 12	8,37 DM	9,88 DM	9,54 DM	27,79 DM	Vp 12	16,74 DM	19,76 DM	19,08 DM	55,58 DM
Median	<b>8,18 DM</b>	<b>10,03 DM</b>	<b>10,68 DM</b>	<b>28,80 DM</b>	Median	<b>16,35 DM</b>	<b>19,92 DM</b>	<b>20,85 DM</b>	<b>56,11 DM</b>

**Tab. F-15:**

Subjektiver Schwierigkeitsgrad der drei Zielgeschwindigkeiten „1“ für „am einfachsten“ und „3“ für „am schwierigsten“ sowie Anzahl der Bewertungen („1“, „2“ u. „3“) pro Zielgeschwindigkeit.

	Vp 01	Vp 02	Vp 03	Vp 04	Vp 05	Vp 06	Vp 07	Vp 08	Vp 09	Vp 10	Vp 11	Vp 12	Median	Anzahl „1“	Anzahl „2“	Anzahl „3“
„Langsam“	3	2	3	3	2	2	2	3	1	3	3	2	<b>2,0</b>	1 Vpn	5 Vpn	6 Vpn
„Mittelschnel“	2	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	3	<b>1,5</b>	5 Vpn	5 Vpn	1 Vpn
„Schnell“	1	3	1	1	3	3	1	1	3	2	2	1	<b>1,0</b>	6 Vpn	2 Vpn	4 Vpn

## Anhang G

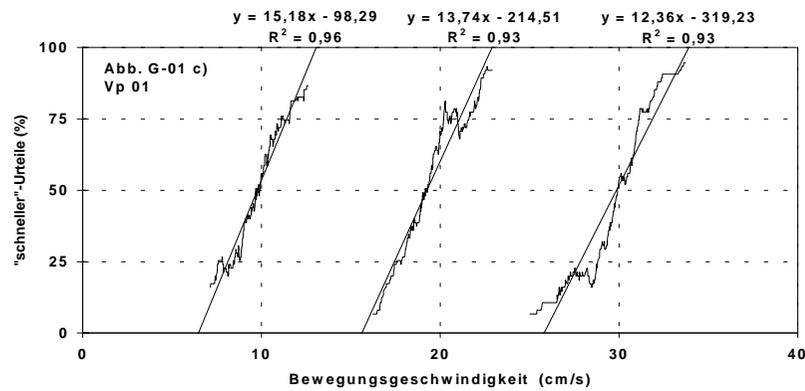
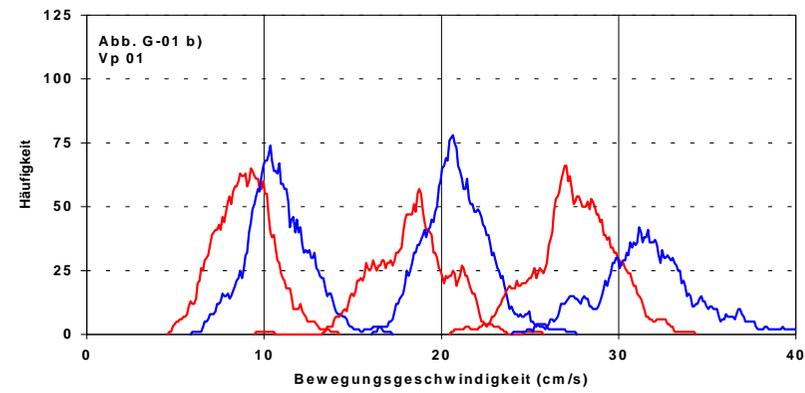
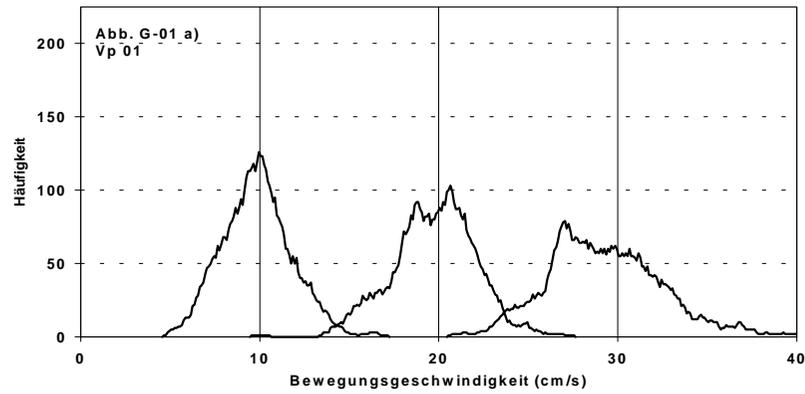
### Experiment 3: Abb. G-01 - G-12:

---

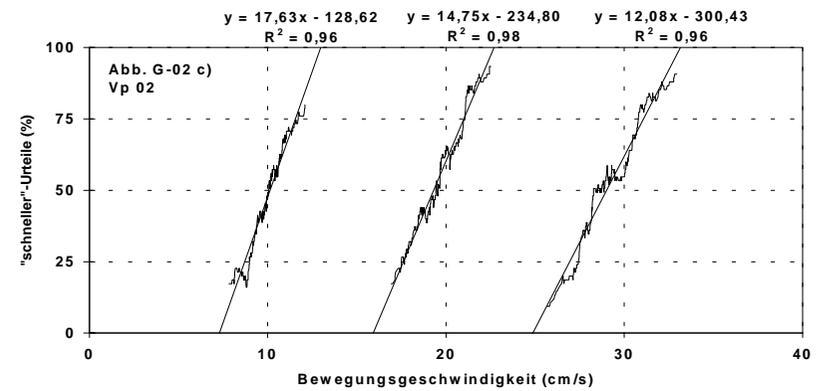
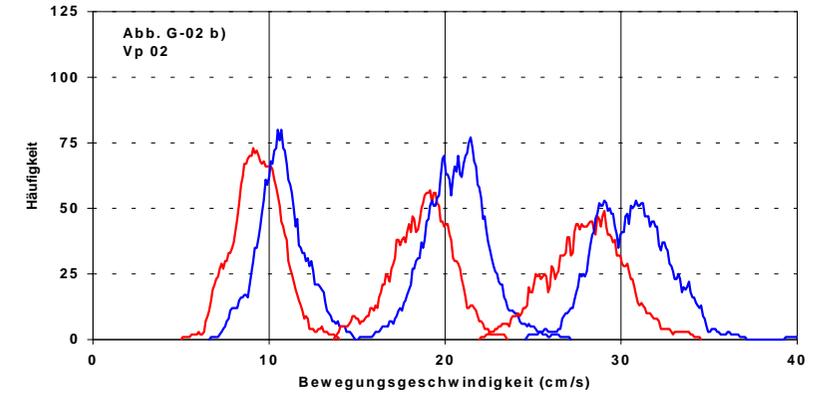
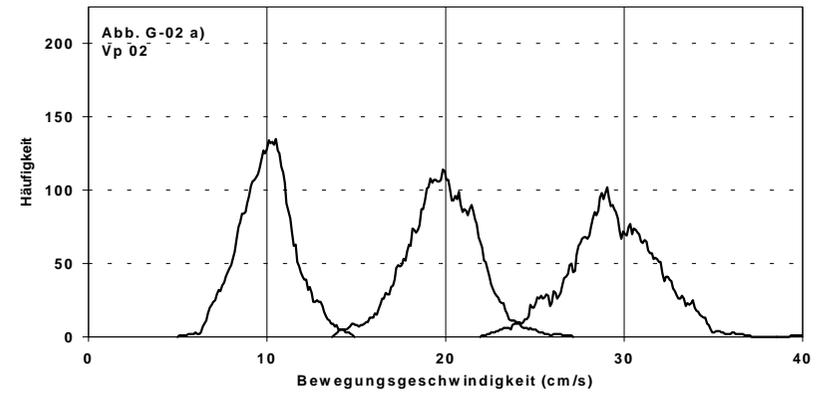
Häufigkeitsverteilungen und psychometrische Funktionen pro

- $V_p$  (N=12) und
  - Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s) )
- d) Individuelle Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten (cm/s), dargestellt mit der Methode gleitender Mediane (Median je 1 cm/s Intervall der in einer Rangreihe angeordneten Werte der Bewegungsgeschwindigkeiten in 0,1 cm/s-Schritten);
- e) Individuelle Häufigkeitsverteilungen der Bewegungsgeschwindigkeiten getrennt nach Urteilkategorien („langsamer“ (rote Linienzüge) / „schneller“ (blaue Linienzüge) );
- f) Individuelle psychometrische Funktionen zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen für die drei Zielgeschwindigkeiten: Prozentanteil der „schneller“-Urteile in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit, dargestellt mit der Methode gleitender Mediane (Median je 75 der in einer Rangreihe angeordneten Werte der Bewegungsgeschwindigkeiten mit einer Schrittweite von einem Datenpunkt).

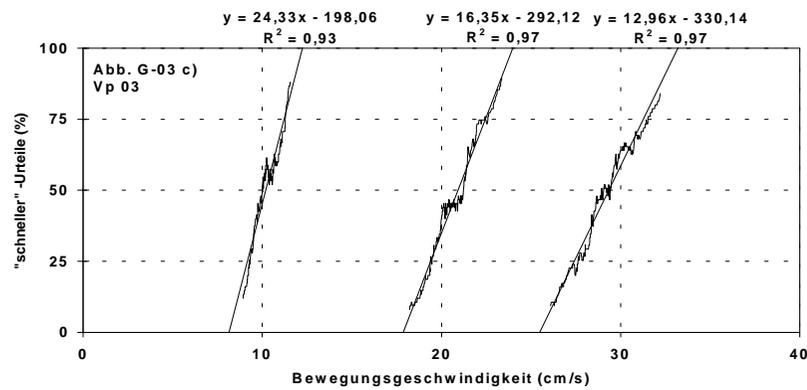
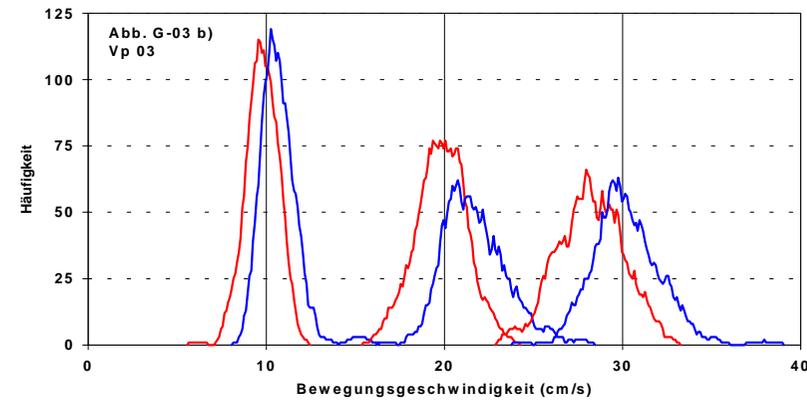
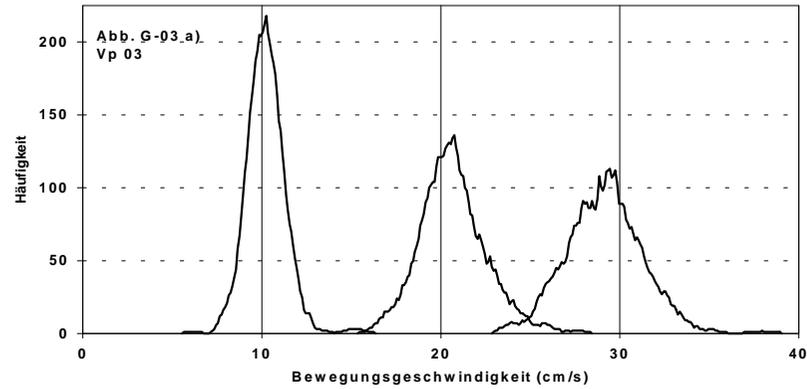
Vp 01



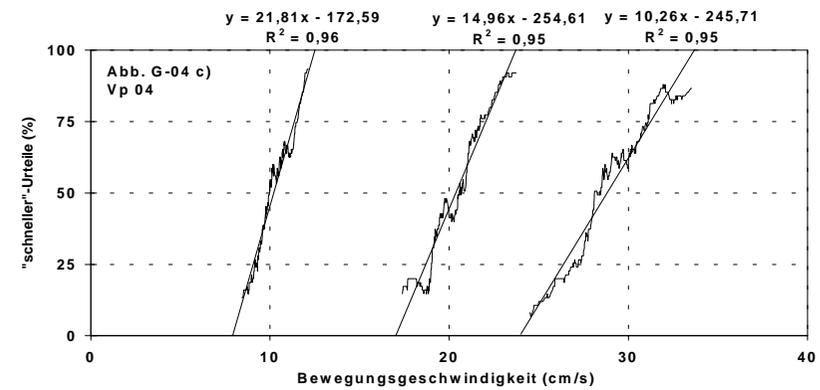
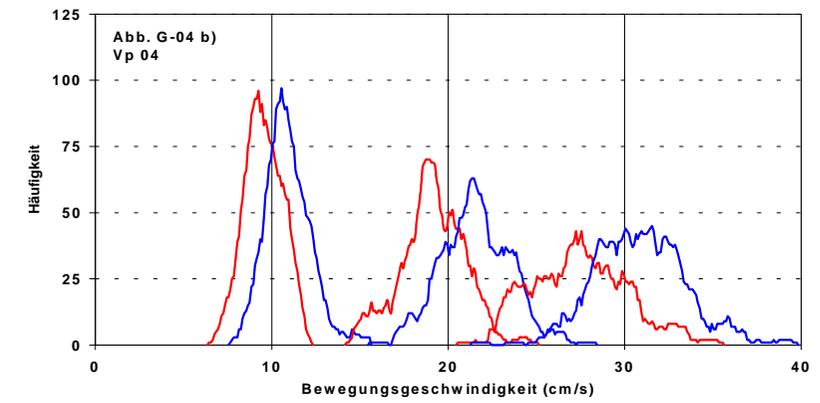
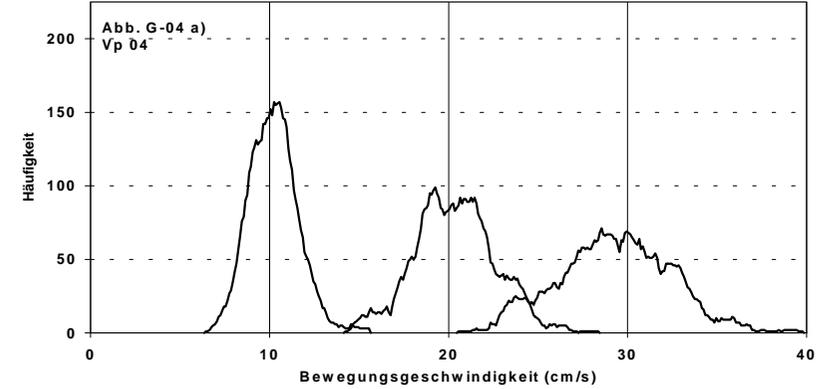
Vp 02



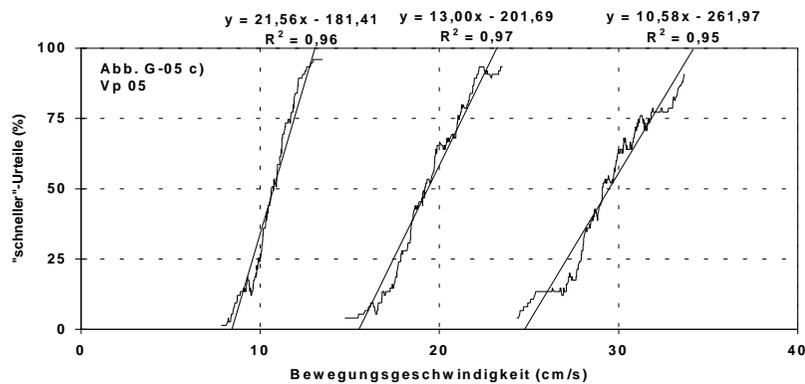
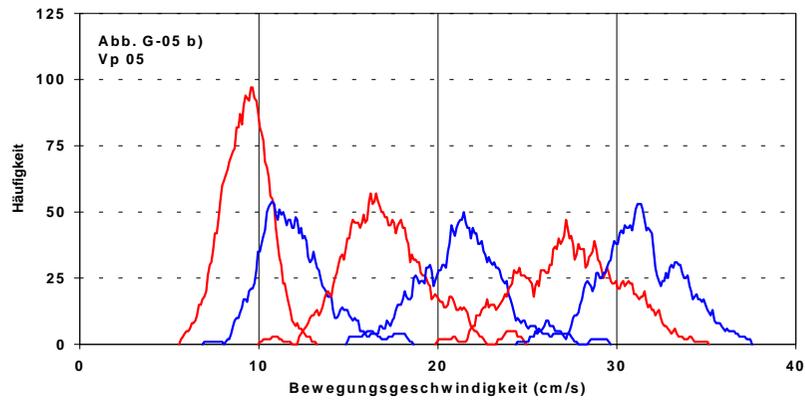
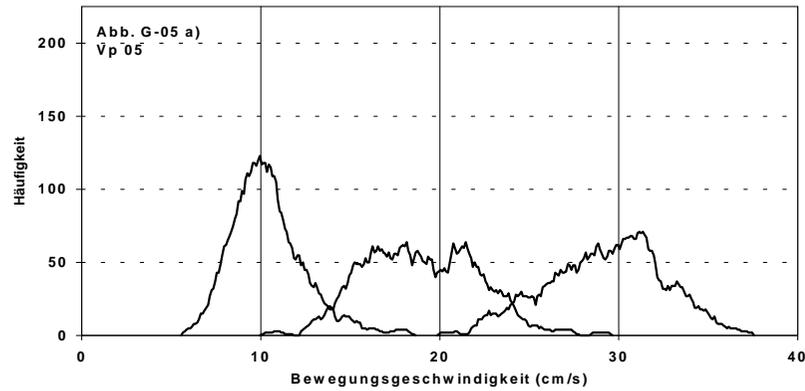
Vp 03



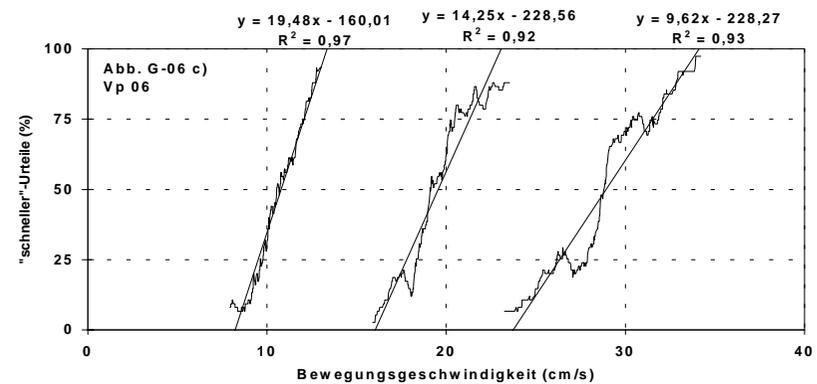
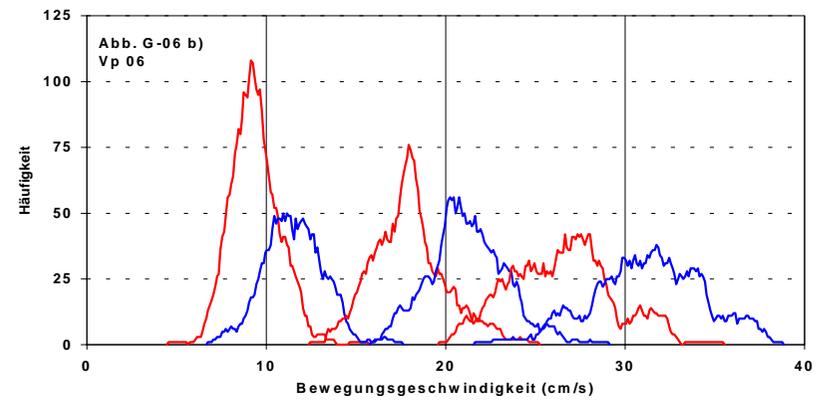
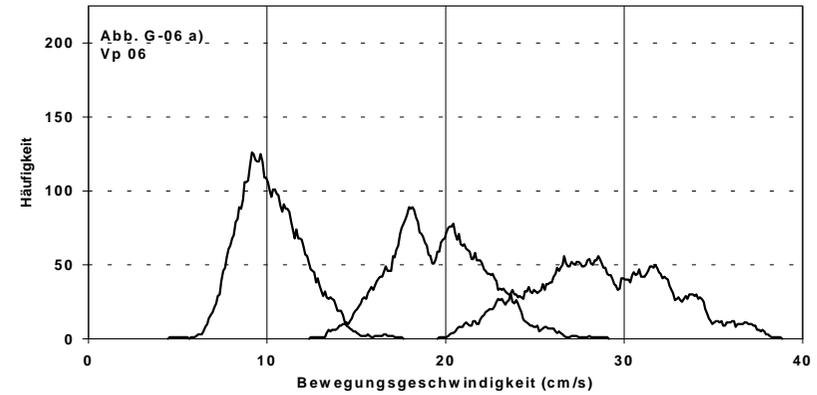
Vp 04



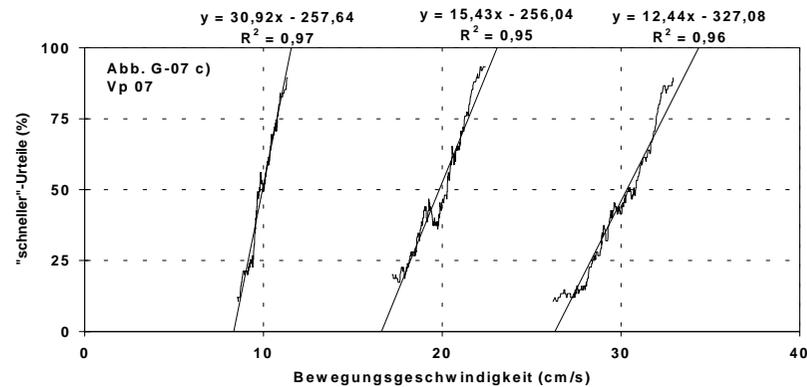
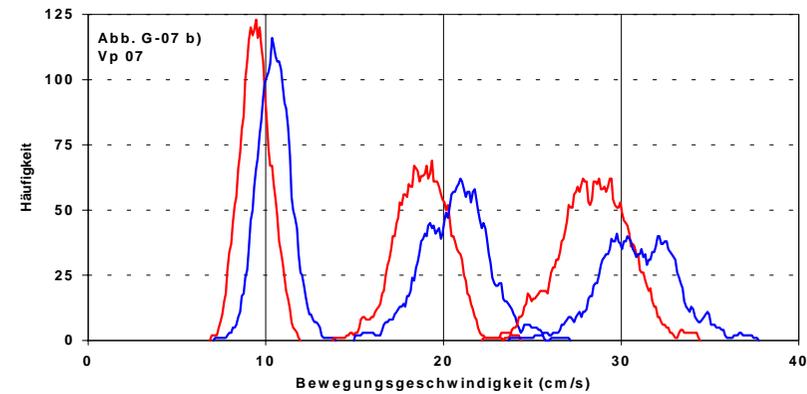
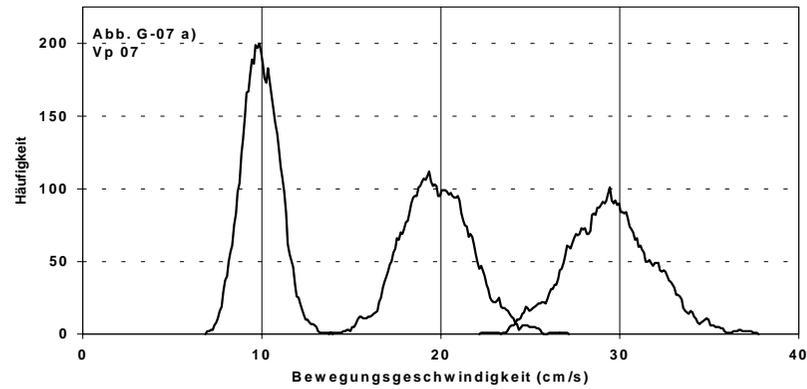
Vp 05



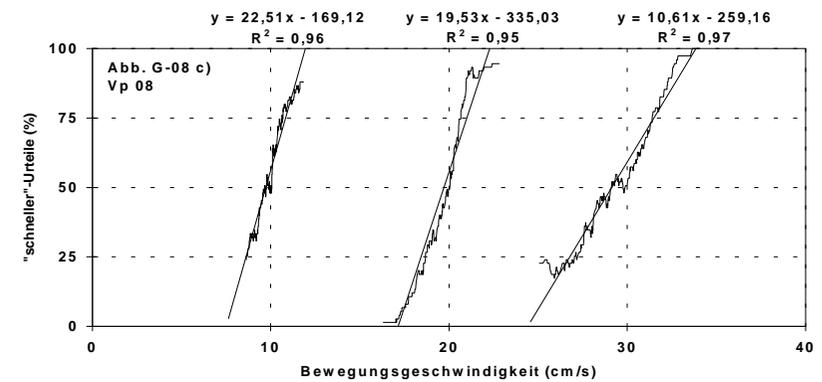
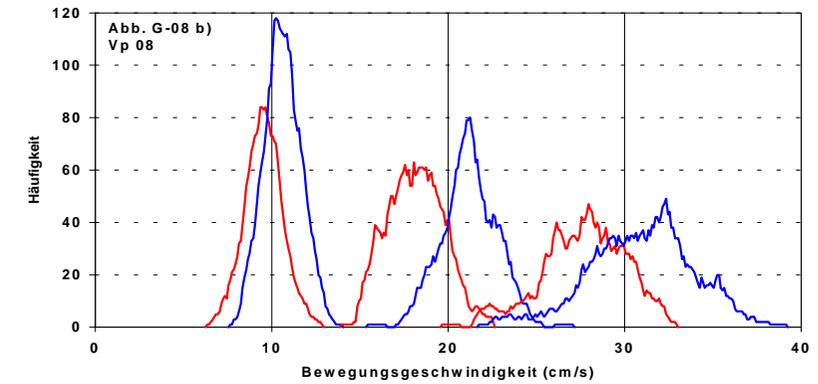
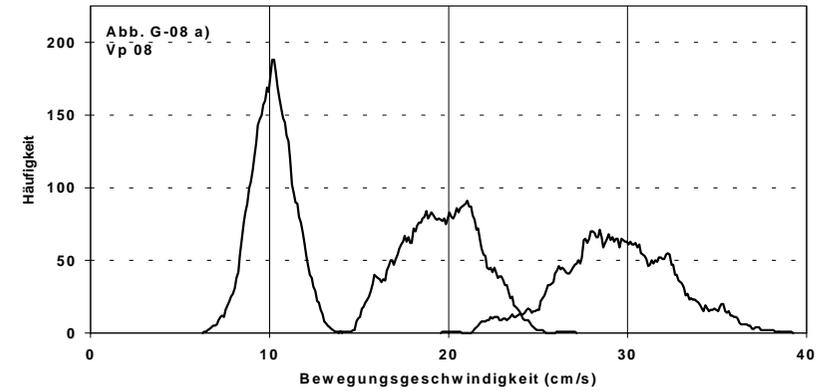
Vp 06



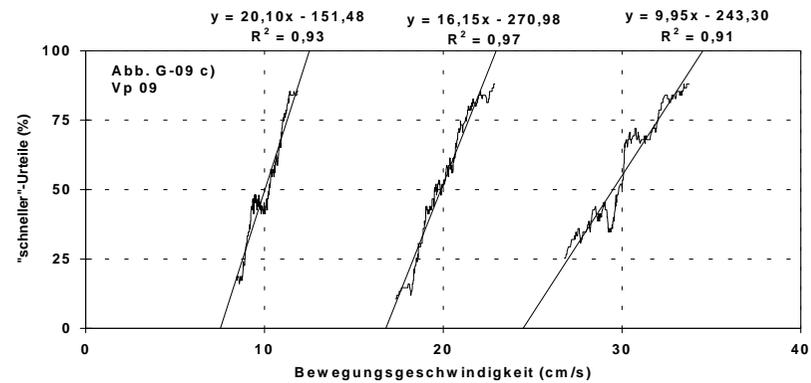
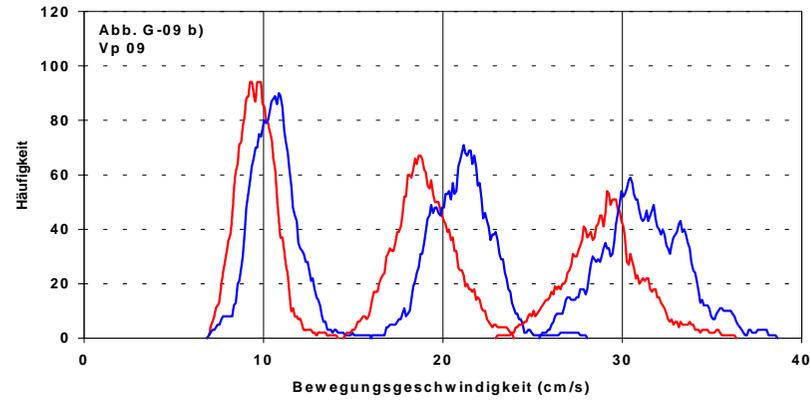
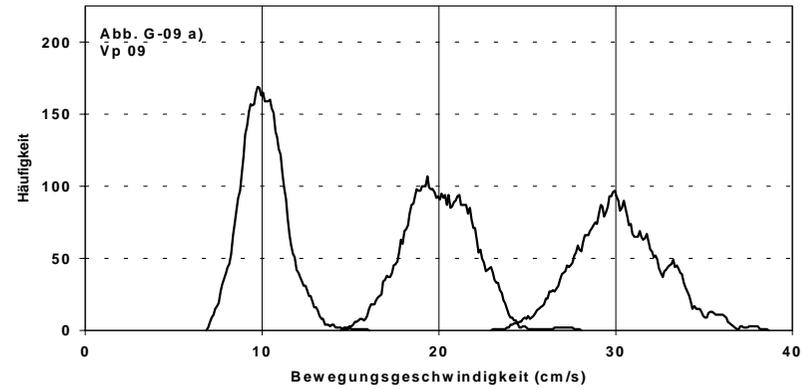
Vp 07



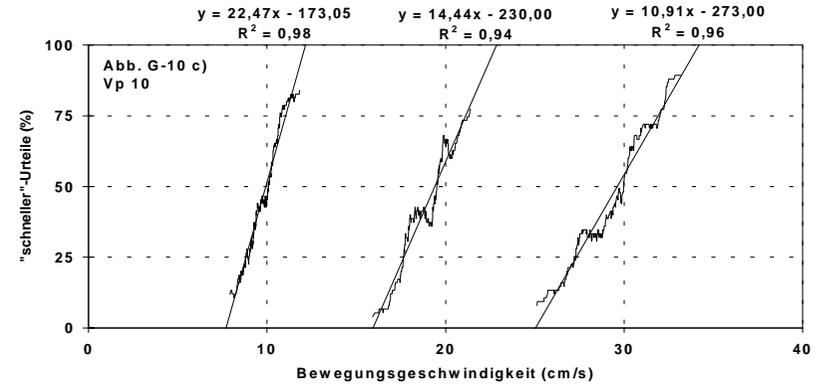
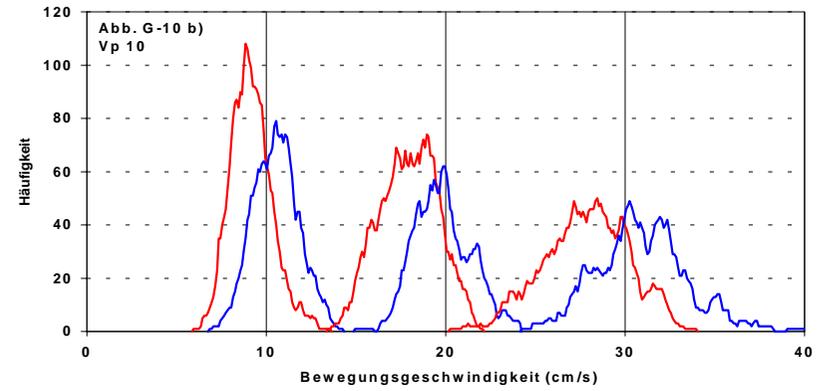
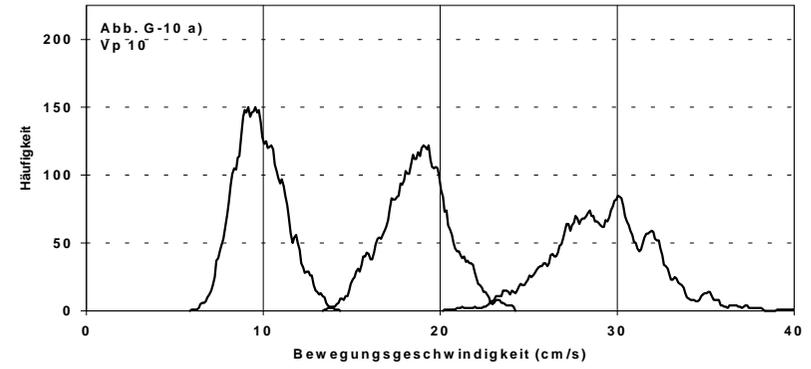
Vp 08



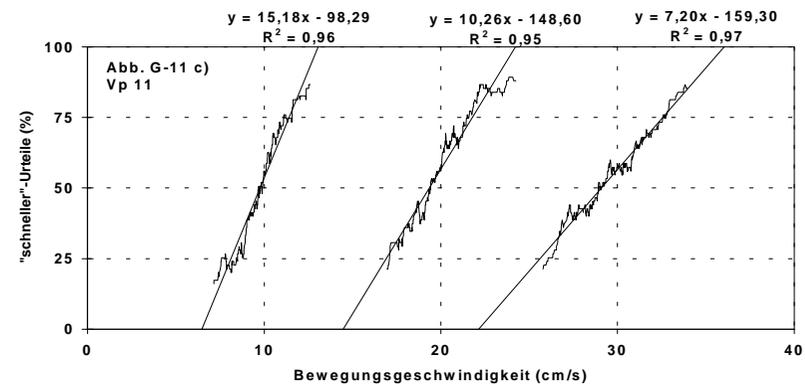
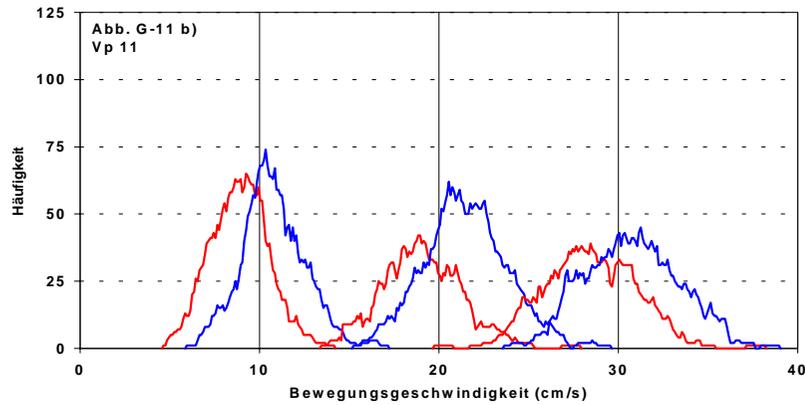
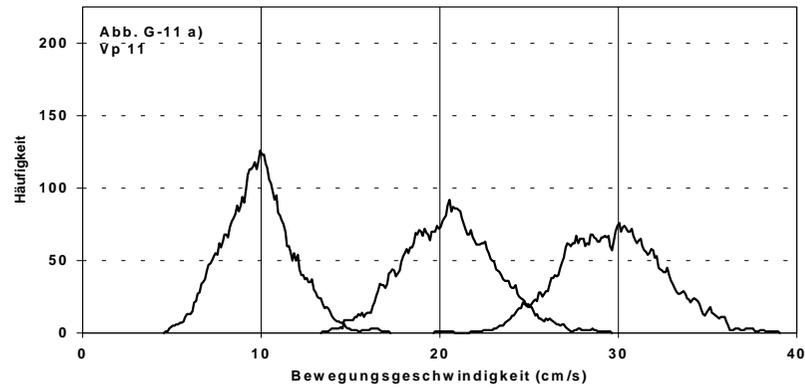
Vp 09



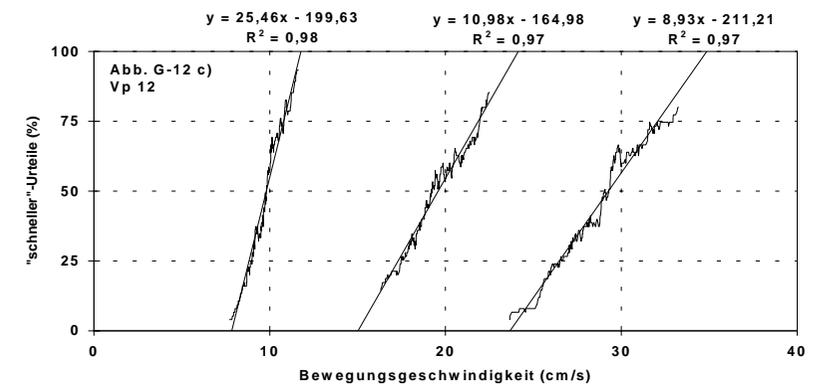
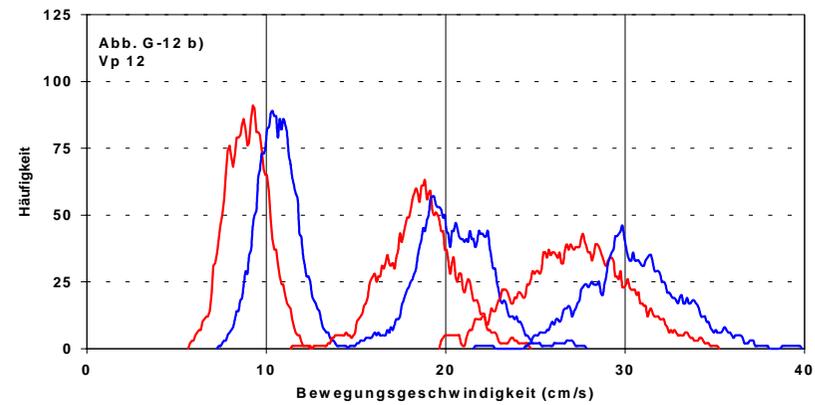
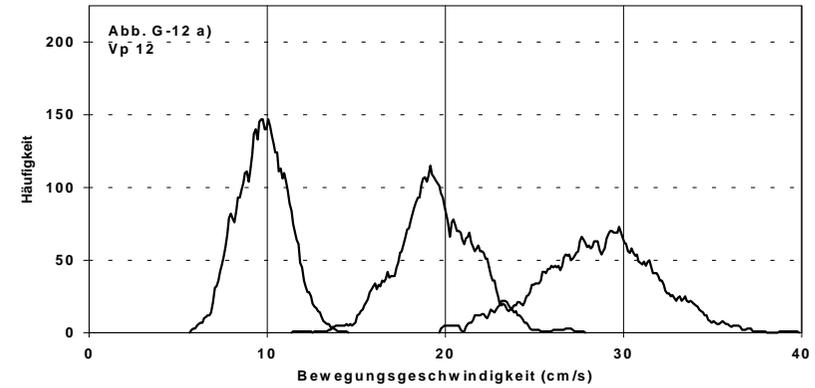
Vp 10



Vp 11



Vp 12



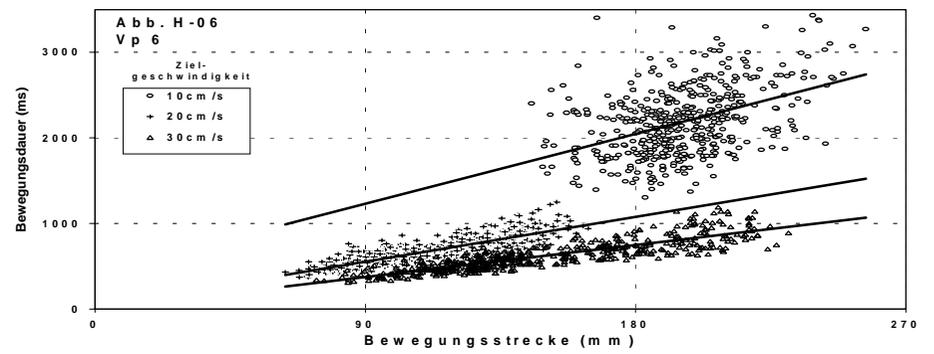
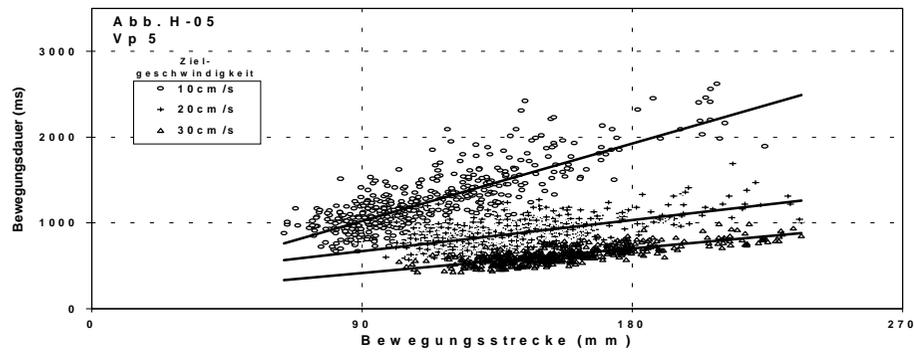
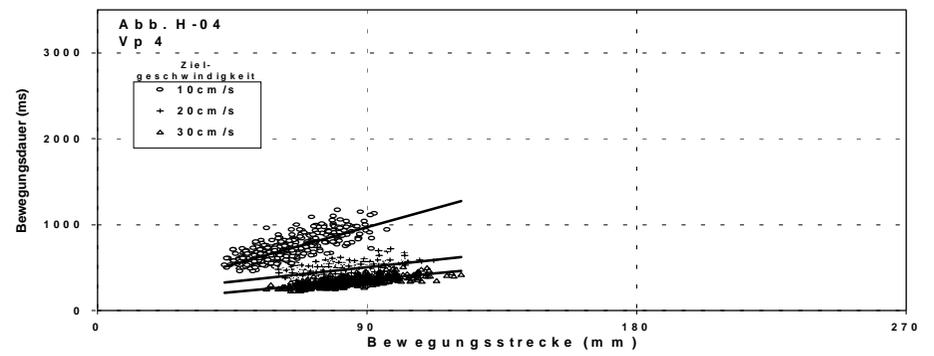
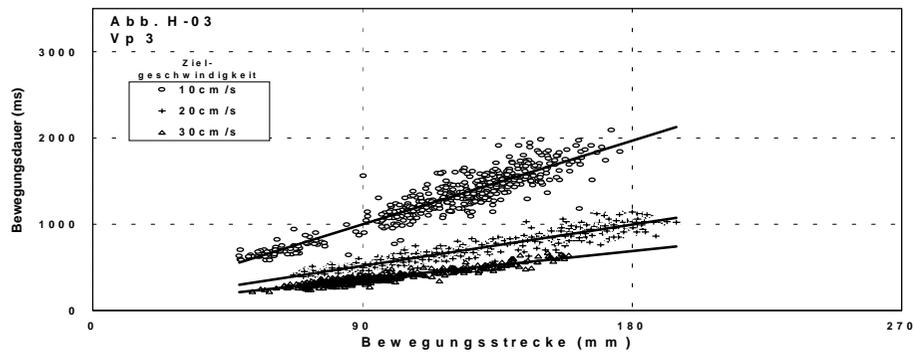
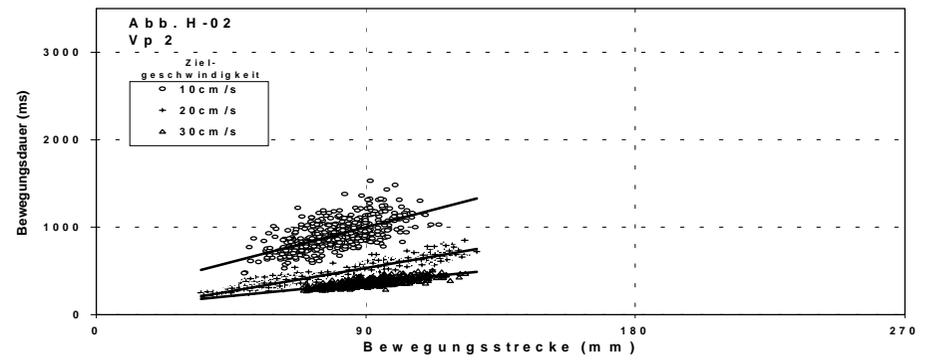
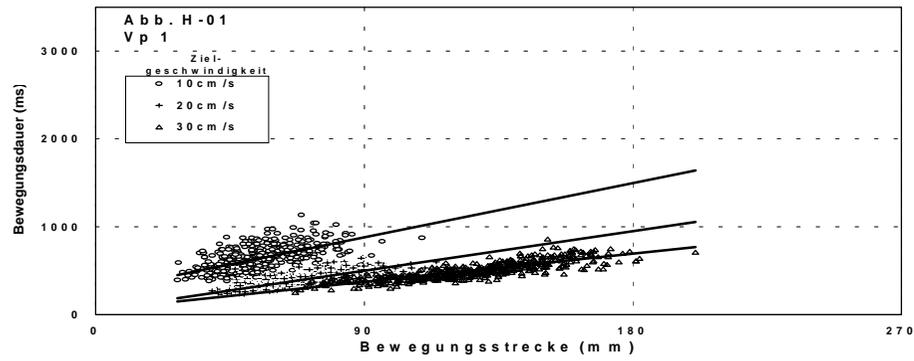
## **Anhang H**

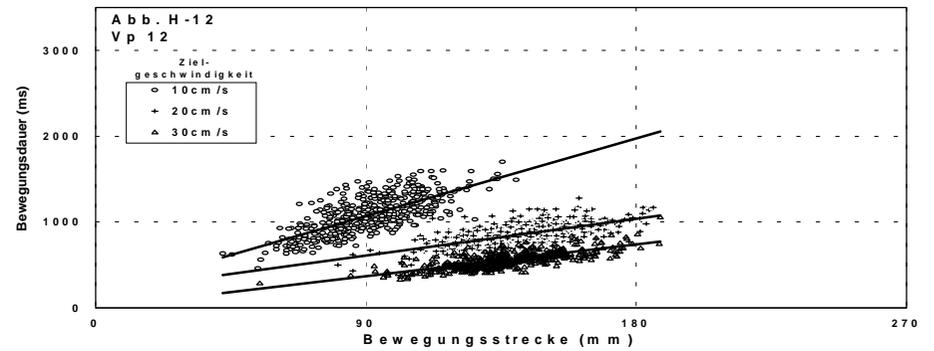
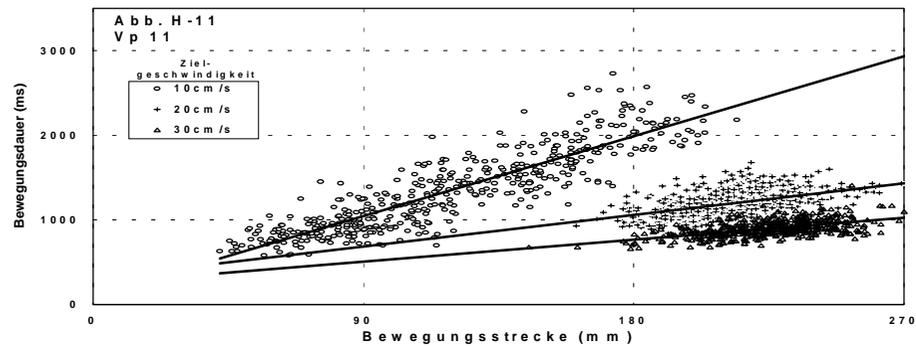
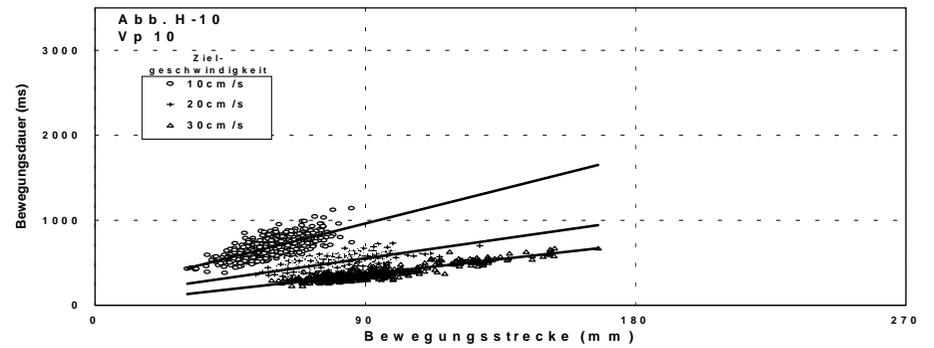
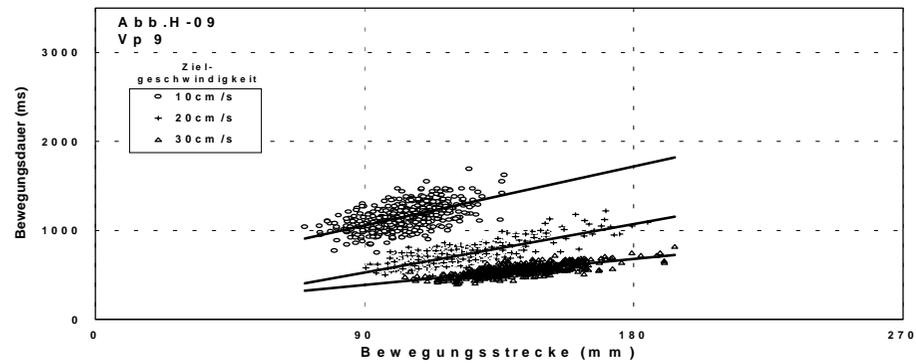
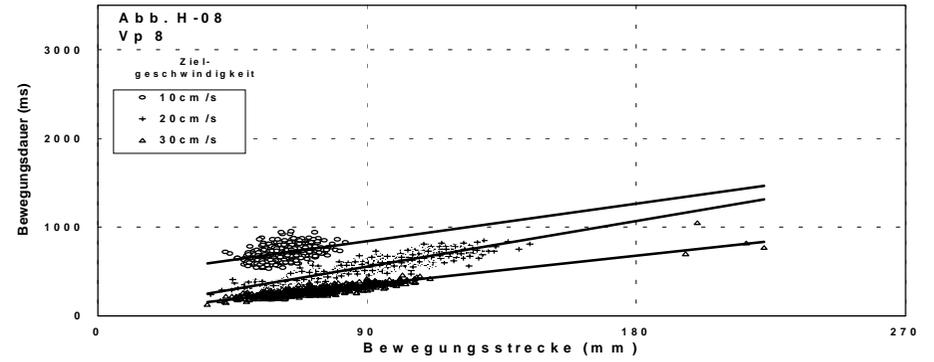
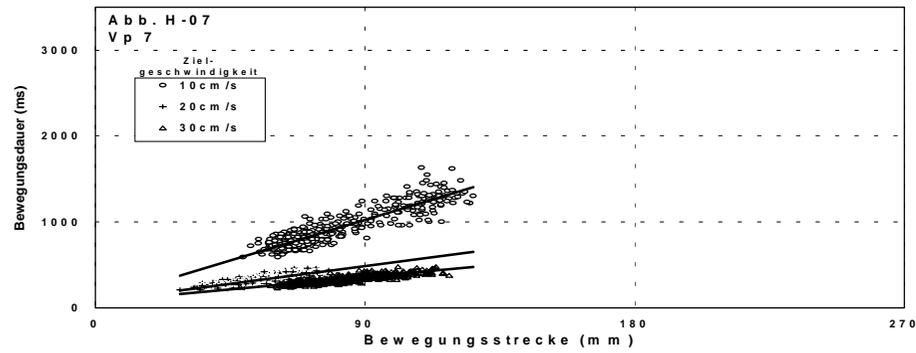
### **Experiment 3: Abb. H-01 bis H-12:**

---

**Bewegungsdauer (ms) in Abhängigkeit von der Bewegungsstrecke (mm) pro**

- **V<sub>p</sub> (N=12),**
- **Zielgeschwindigkeit („Langsam“ (10 cm/s) / „Mittelschnell“ (20 cm/s) / „Schnell“ (30 cm/s) )  
und**
- **Bewegungsaufnahme (N = 475).**





## Literaturverzeichnis

**Abbruzzese, G., Berardelli, A., Rothwell, J.C., Day, B.L. & Marsden C.D. (1985)**  
Cerebral potentials and electromyographic responses evoked by stretch of wrist muscles in man.  
Exp. Brain Res., 58: 544-551.

**Al-Falahe, N.A., Nagaoka, M. & Vallbo, A.B. (1990)**  
Response profiles of human muscle afferents during active finger movements.  
Brain, 113: 325-346.

**Albe-Fessard, D. & Liebeskind, J. (1966)**  
Origine des messages somato-sensitifs activant les cellules du cortex moteur chez le singe.  
Exp. Brain Res., 1: 127-146.

**Amassian, V.E., Cracco, R.Q. & Maccabee, P.J. (1989)**  
A sense of movement elicited in paralyzed distal arm by focal magnetic coil stimulation of human motor cortex.  
Brain Res., 479: 355-360.

**Bastian, H.C. (1888)**  
The "muscular sense"; its nature and cortical localisation.  
Brain, 10: 1-137.

**Bauswein, E., Fromm, C., Werner, W. & Ziemann, U. (1991)**  
Phasic and tonic responses of premotor and primary motor cortex neurons to torque changes.  
Exp. Brain Res., 86: 303-310.

**Bell, C. (1826)**  
On the nervous circle which connects the voluntary muscles with the brain.  
Philosophical Transactions of the Royal Society, 116: 163-173.

**Bell, C. (1833)**  
The Hand - Its Mechanism and Vital Endowments as Evincing Design.  
London: William Pickering.

**Browne, K., Lee, J. & Ring, P.A. (1954)**  
The sensation of passive movement at the metatarsophalangeal joint of the great toe in man.  
J. Physiol., 126: 448-458.

**Bryan, W.L. (1892)**  
On the development of voluntary motor ability.  
Am. J. Psy., 5: 125-204.

**Bullock, D., Cisek, P. & Grossberg, S. (1998)**  
Cortical networks for control of voluntary arm movements under variable force conditions.  
Cereb. Cortex, 8: 48-62.

**Burgess, P.R., Wei, J.Y., Clark, F.J. & Simon, J. (1982)**  
Signaling of kinesthetic information by peripheral sensory receptors.  
Ann. Rev. Neurosci., 5: 171-187.

**Burke, D., Gandevia, S.C. & Macefield, G. (1988)**  
Responses to passive movement of receptors in joint, skin and muscle of the human hand.  
J. Physiol. Lond., 402: 347-361.

**Bushnell, M.C., Goldberg, M.E. & Robinson, D.L. (1981)**  
Behavioral enhancement of visual responses in monkey cerebral cortex. I. Modulation in posterior parietal cortex related to selective visual attention.  
J. Neurophysiol. 46: 755-772.

**Campbell, E.J.M. (1970)**

Discussion: The sense of effort.

In: R. Porter (ed.). Breathing: Hering-Breuer Centenary Symposium (p. 213). Churchill, London.

**Chapman, C.E., Spidalieri, G. & Lammarre, Y. (1984)**

Discharge properties of area 5 neurones during arm movements triggered by sensory stimuli in the monkey.

Brain Res., 309: 63-77.

**Clark, F.J. & Horch, K.W. (1986)****Kinesthesia**

In: K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (eds.). Handbook of perception and human performance. Vol. 1: Sensory Processes and Perception (Ch. 13). Wiley and Sons, N.Y.

**Cleghorn, T.E. & Darcus, H.D. (1952)**

The sensibility to passive movement of the human elbow joint.

Quartl. J. Exptl. Psychol., 4: 66-77.

**Cohen, L.G., Starr, A. & Pratt, H. (1985)**

Cerebral somatosensory potentials evoked by muscle stretch, cutaneous taps and electrical stimulation of peripheral nerves in the lower limbs in man.

Brain, 109: 1195-1208.

**Collins, D.F., Refshauge, K.M. & Gandevia, S.C. (2000)**

Sensory integration in the perception of movements at the human metacarpophalangeal joint.

J. Physiol. 529: 2505-2515.

**Cordo, P., Carlton, L., Bevan, L., Carlton M. & Kerr, G.K. (1994)**

Proprioceptive coordination of movement sequences: role of velocity and position information.

J. Neurophysiol., 71: 1848-1861.

**Crago, P.E., Houk, J.C. & Rymer, W.Z. (1982)**

Sampling of total muscle force by tendon organs.

J. Neurophysiol., 47: 1069-1083.

**Craig, J.C. & Rollman, G.B (1999)**

Somesthesia.

Annu. Rev. Psychol. 50: 305-331.

**Craske, B (1977)**

Perception of impossible limb positions induced by tendon vibration.

Science, 196 (4285): 71-73.

**Dichgans, J. & Brandt, Th. (1978)**

Visual-vestibular interaction: effects on self-motion perception and postural control.

In: Held, R., Leibowitz, H.W. & Teuber, H.-L. (eds.). Handbook of Sensory Physiology, Vol. VIII: Perception (Ch. 25, pp. 755-804). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, NY.

**Duden (1996)**

Deutsches Universalwörterbuch.

Dudenverlag Mannheim, Leipzig, Zürich.

**Duden (1999)**

Das große Wörterbuch der deutschen Sprache.

Dudenverlag Mannheim, Leipzig, Zürich, 3. A.; Bd.5.

**Edin, B.B. (1990)**

Finger joint movement sensitivity of non-cutaneous mechanoreceptor afferents in the human radial nerve.

Exp. Brain Res., 82: 417-422.

**Essick, G.K., Franzen, O. & Whitsel, B.L. (1988)**

Discrimination and scaling of velocities of stimulus motion across the skin.

Somatosens. Mot. Res., 6: 21-40.

**Fery, Y.A. & Morizot, P. (2000)**

Kinesthetic and visual image in modelling closed motor skills: the example of the tennis serve. *Percept. Mot. Skills*, 90: 707-722.

**Fetz, E.E., Finocchio, D.V., Baker, M.A. & Soso, M.J. (1980)**

Sensory and motor responses of precentral cortex cells during comparable passive and active movements.

*J. Neurophysiol.*, 43: 1070-1089.

**Fitts, P.M. (1954)**

The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movements.

*J. Exp. Psy.*, 47: 381-391.

**Fourneret, P. & Jeannerod (1998)**

Limited conscious monitoring of motor performance in normal subjects.

*Neuropsychologia*, 36: 1133-1140.

**Freund, H.-J. (1986)**

Time control of hand movements.

*Prog. Brain Res.*, 64: 287-294.

**Gandevia, S.C., Hall, L.A., McCloskey, D.I. & Potter, E.K. (1983).**

Proprioceptive sensation at the terminal joint of the middle finger.

*J. Physiol. Lond.*, 335: 507-517.

**Gandevia, S.C. (1985)**

Illusory movements produced by electrical stimulation of low-threshold muscle afferents from the hand.

*Brain*, 108: 965-981.

**Gandevia, S.C. & Burke, D. (1988)**

Projection to the cerebral cortex from proximal and distal muscles in the human upper limb.

*Brain*, 111: 389-403.

**Gardner, E.P. & Costanzo, R.M. (1981)**

Properties of kinesthetic neurons in somatosensory cortex of awake monkeys.

*Brain Res.*, 214: 301-319.

**Goldscheider, A. (1889)**

Untersuchungen über den Muskelsinn.

*Arch. Anat. Physiol.* 3: 369-502.

**Goodwin, G.M., McCloskey, D.I. & Matthews, P.B.C. (1972 a)**

The persistence of appreciable kinesthesia after paralyzing joint afferents but preserving muscle afferents.

*Brain Research*, 37: 326-329.

**Goodwin, G.M., McCloskey, D.I. & Matthews, P.B.C. (1972 b)**

The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents.

*Brain*, 95: 705-748.

**Goodwin, G.M. (1976)**

The sense of limb position and movement.

*Exercise Sport Sci. Rev.* 4: 87-124

**Grigg, P. & Hoffmann A.H. (1982)**

Properties of Ruffini afferents revealed by stress analysis of isolated sections of cat knee capsule.

*J. Neurophysiol.*, 47: 41-54.

**Grigg, P., Hoffmann A.H. & Fogarty, K.E. (1982)**

Properties of Golgi-Mazzoni afferents in cat knee joint capsule, as revealed by mechanical studies of isolated joint capsule.

*J. Neurophysiol.*, 47: 31-40.

- Grill, S., Hallett, M., Marcus, C. & McShane, L. (1994)**  
Disturbances of kinaesthesia in patients with cerebellar disorders.  
Brain, 117: 1433-1447.
- Hall, L.A. & McCloskey, D.I. (1983)**  
Detections of movements imposed on finger, elbow and shoulder joints.  
J. Physiol., 335: 519-533.
- Head, H. & Holmes, G. (1911)**  
Sensory disturbances from cerebral lesions.  
Brain, 32: 102-254.
- Helmholtz, H. (1925)**  
„Helmholtz's Treatise on Physiological Optics.“ 3<sup>rd</sup> Edition. Edited and transl. by J.P.C. Southall.  
Menasha, Wisconsin: Optical Society of America. Vol. 3. (originally published 1867).
- Henderson, W.R. & Smyth, G.E. (1948)**  
Phantom limbs.  
J. Neurol., Neurosurg., Psych., 11: 88-112.
- Hopkins, B. (1972)**  
Proprioception and/or kinesthesia.  
Perceptual and Motor Skills, 34: 431-435.
- Hore, J., Preston, J.B., Durkovic, R.G. & Cheney, P.D. (1976)**  
Responses of cortical neurons ( area 3a and 4 ) to ramp stretch of hindlimb muscles in the baboon.  
J. Neurophysiol., 39: 484-500.
- Houk, J.C., Rymer, W.Z. & Crago, P.E (1981)**  
Dependence of dynamic response of spindle receptors on muscle length and velocity.  
J. Neurophysiol., 46: 143-166.
- Hyvarinen, J. (1982)**  
The parietal cortex of monkey and man.  
Berlin, Springer-Verlag.
- Iwamura, Y. & Tanaka, M. (1996)**  
Representation of reaching and grasping in the monkey postcentral gyrus.  
Neuroscience Letters, 214: 147-150.
- Jasper H.H. & Bertrand, G. (1966)**  
Thalamic units involved in somatic sensation and voluntary and involuntary movements in man.  
In: Purpura, D.P., Yahr, M.D. (eds.) The Thalamus (pp. 365-390). Columbia University Press, N.Y.
- Jones, E.G. & Friedman, D.P. (1982)**  
Projection pattern of functional components of thalamic ventrobasal complex on monkey somatosensory cortex.  
J. Neurophysiol., 48: 521-543.
- Kaas, J.H. & Pons, T.P. (1988)**  
The somatosensory system of primates.  
In: Steklis, H.D. & Erwin, J. (eds.). Comparative primate biology (pp. 421-468). Liss, N.Y.
- Karwowsky, W., Shumate, C., Yates, J.W. & Pongpatana, N. (1992)**  
Discriminability of load heaviness: implications for the psychophysical approach to manual lifting.  
Ergonomics, 35: 729-744.
- Katz, D. (1969)**  
Über die Transponierung von Handlungsgestalten.  
In: Katz, D. Gestaltpsychologie (pp. 129-143). Schwabe & Co, Basel.
- Kokmen, E., Bossemeyer, R.W.Jr. & Williams, W.J. (1977)**  
Quantification of motion perception in the digits: A psychophysical study in normal human subjects.  
Ann. Neurol., 2: 279-284.

**Lackner, J.R. (1975)**

Pursuit eye movements elicited by muscle afferent information.  
Neurosci. Lett., 1: 25-28.

**Laidlaw, R.W. & Hamilton, M.A. (1937)**

A study of threshold in apperception of passive movement among normal control subjects.  
Bull. neurol. Inst. N.Y., 6: 268-273.

**Landgren, S., Silfenius, H. & Wolsk, D. (1967)**

Somato-sensory paths to the second cortical projection area of the group I muscle afferents.  
J. Physiol., London, 191: 543-559.

**Laszlo, J.I. (1966)**

The performance of a simple motor task with kinaesthetic sense loss.  
Quart. J. Exptl. Psychol., 18: 1-8.

**Leksell, L. (1945)**

The action potential and excitatory effects of the small ventral root fibres to skeletal muscle.  
Acta Physiol. Scand., 10 (Suppl.): 1-84.

**Lenz, F.A., Kwan, H.C., Dostrovsky, J.O., Tasker, R.R., Murphy, J.T. & Lenz, Y.E. (1990)**

Single unit analysis of the human ventral thalamic nuclear group. Activity correlated with movement.  
Brain, 113: 1795-1821.

**Lenz, F.A., Kwan, H.C., Martin, R.L., Tasker, R.R., Dostrovsky, J.O. & Lenz, Y.E. (1994)**

Single unit analysis of the human ventral thalamic nuclear group. Tremor related activity in functionally identified cells.  
Brain, 117: 531-543.

**Lienert, G.A. (1973)**

Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik  
Band 1, 2. Auflage, S. 46  
Verlag Anton Hain, Meisenheim a.G.

**Livingstone, M. & Hubel, D. (1988)**

Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception.  
Science, 240: 740-749.

**Lucier, G.E., Ruegg, D.C. & Wiesendanger, M. (1975)**

Responses of neurones in motor cortex and in area 3a to controlled stretches of forelimb muscles in cebus monkeys.  
J. Physiol. (Lond.), 251: 833-853.

**Lüscher, C., Rösler, K.M., Mathis, J. Beer, S. & Hess, C.W. (1996)**

The perception of movements elicited by magnetic cortex stimulation depends on the site of stimulation.  
Exp. Brain Res., 109: 154-157.

**Matthews, P.B.C. & Simmonds, A. (1974)**

Sensations of finger movement elicited by pulling upon flexor tendons in man.  
J. Physiol., 239: 27-28.

**McCall, W.D., Farias, M.C., Williams, W.J. & Bement, S.L. (1974)**

Static and dynamic responses of slowly adapting joint receptors.  
Brain Res., 70: 221-243.

**McCloskey, D.I. (1973)**

Differences between the senses of movement and position shown by the effects of loading and vibration of muscles in man.  
Brain Res., 61: 119-131.

**McCloskey, D.I. (1978)**

Kinesthetic sensibility.  
Physiol. Rev., 58: 763-820.

- McCloskey, D.I., Cross, M.J., Honner, R. & Potter, E.K. (1983)**  
Sensory effects of pulling or vibrating exposed tendons in man.  
Brain, 106, 21-37.
- Merton, P.A. (1964)**  
Human position sense and sense of effort.  
Symp. Soc. exp. Biol., 18: 387-400.
- Milner, T.E. (1986)**  
Judgment and control of velocity in rapid voluntary movements.  
Exp. Brain Res., 62: 99-110.
- Mima, T., Terada, K., Maekawa, M., Nagamine, T., Ikeda, A. & Shibasaki, H. (1996)**  
Somatosensory evoked potentials following proprioceptive stimulation of finger in man.  
Exp. Brain Res., 111: 233-245.
- Mountcastle, V.B. & Powell, T.P.S. (1959)**  
Centralnervous mechanism subserving position sense and kinesthesia.  
Bull. J. Hopkins. Hosp., 105: 173-200.
- Mountcastle, V.B., Lynch, J.C., Georgopoulos, A., Sakata, H. & Acuna, C. (1975)**  
Posterior parietal association cortex of the monkey: command functions for operations within extrapersonal space.  
J. Neurophysiol., 38: 871-908.
- Ohye, C., Shibasaki, T., Hirai, T., Wada, H., Hirato, M. & Kawashima, Y. (1989)**  
Further physiological observations on the ventralis intermedialis neurons in the human thalamus.  
J. Neurophysiol., 61: 488-500.
- Oscarsson, O. & Rosén, I. (1963)**  
I. Projection to cerebral cortex of large muscle-spindle afferents in forelimb nerves of the cat.  
J. Physiol., 169: 924-945.
- Paillard, J. & Brouchon, M. (1968)**  
Active and passive movements in the calibration of position sense.  
In: S.J. Freedman (ed.). The neuropsychology of spatially oriented behavior (Ch. III, pp. 37-55).  
The Dorsey Press, Homewood, Illinois.
- Park, S., Toole, T. & Lee, S. (1999)**  
Functional role of the proprioceptive system in the control of goal-directed movement.  
Percept. Mot. Skills, 88: 631-647.
- Pascual-Leone, A., Cohen, L.G., Brasil-Neto, J.P., Valls-Sole, J. & Hallett, M. (1994)**  
Differentiation of sensorimotor neuronal structures responsible for induction of motor evoked potentials, attenuation in detection of somatosensory stimuli, and induction of sensation of movement by mapping of optimal current directions.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol., 93: 230-236.
- Passingham, R.E. (1988)**  
Premotor cortex and preparation for movement.  
Exp. Brain Res., 70: 590-596.
- Phillips, C.G., Powell, T.P.S. & Wiesendanger, M. (1971)**  
Projection from low-threshold muscle afferents of hand and forearm to area 3a of baboon's cortex.  
J. Physiol., 217: 419-446.
- Piek, J.P., Pitcher, T.M. & Hay, D.A. (1999)**  
Motor coordination and kinaesthesia in boys with attention-deficit-hyperactivity disorder.  
Dev. Med. Child. Neurol., 41: 159-165.
- Reddy, H., Floyer, A., Donaghy & M., Matthews, P.M (2001)**  
Altered cortical activation with finger movement after peripheral denervation: comparison of active and passive tasks.  
Exp. Brain Res., 138: 484-491.

**Riddoch, G. (1941)**

Phantom limbs and body shape.  
Brain, 64: 197-222.

**Robinson, D.L., Goldberg, M.E. & Stanton, G.B. (1978)**

Parietal association cortex in the primate: sensory mechanisms and behavioral modulations.  
J. Neurophysiol. 41: 910-932.

**Roll, J.P. & Vedel, J.P. (1982)**

Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography.  
Exp. Brain Res., 47: 177-190.

**Schwartz, D.W.F., Deecke, L. & Fredrickson J.M. (1973)**

Cortical projection of group I muscle afferents to areas 2, 3a, and the vestibular field in the rhesus monkey.  
Exp. Brain Res., 17: 516-526.

**Sherrington, C.S. (1900)**

The muscular sense.  
In: E.A. Schaefer (ed.): Text-Book of Physiology (Vol. 2, pp. 1002-1025).  
Edinburgh: Pentland,

**Sherrington, C.S. (1906)**

On the proprio-ceptive system, especially in its reflex aspect.  
Brain, 29: 467-482.

**Sittig, A.C., van der Gon, D. & Gielen, C.C.A.M. (1985)**

Separate control of arm position and velocity demonstrated by vibration of muscle tendon in man.  
Exp. Brain Res., 60: 445-453.

**Sittig, A.C., van der Gon, D. & Gielen, C.C.A.M. (1987)**

The contribution of afferent information on position and velocity to the control of slow and fast human forearm movements.  
Exp. Brain Res., 67: 33-40.

**Skoglund, S. (1956)**

Anatomical and physiological studies of knee joint innervation in cat.  
Acta Physiol. Scand. Suppl., 124: 1-101.

**Skoglund, S. (1973)**

Joint receptors and kinesthesia.  
In: A. Iggo (ed.). Handbook of Sensory Physiology. Vol. II: Somatosensory Systems (pp. 111-136).  
Springer.

**Soso, M.J. & Fetz, E.E. (1980)**

Responses of identified cells in postcentral cortex of awake monkeys during comparable active and passive joint movements.  
J. Neurophysiol., 43: 1090-1110.

**Sperry, R.W. (1950)**

Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual neural inversions.  
J. Comp. Physiol. Psy., 43: 482-489.

**Starr, A.D., McKeon, B., Skuse, N. & Burke, D. (1981)**

Cerebral potentials evoked by muscle stretch in man.  
Brain, 104: 149-166.

**Stein, J.F. (1989)**

Representation of egocentric space in the posterior parietal cortex.  
Quarterly Journal of Exp. Physiol., 74: 583-606.

**Swinnen, S.P., Steyvers M., Van den Bergh, L. & Stelmach, G.E. (2000)**

Motor learning and Parkinson's disease: refinement of within-limb and between-limb coordination as a result of practice.

Behav. Brain Res., 111: 45-49.

**Takahashi, N. & Kawamura, M. (1998)**

Difficulty in reaching objects due to posterior cerebral artery occlusion.

Rinsho Shinkeigaku, 38: 402-406.

**Thelen, D.G., Brockmiller, C., Ashton-Miller, J.A., Schultz, A.B. & Alexander, M.B. (1998)**

Thresholds for sensing foot-dorsi- and plantarflexion during upright stance: effects of age and velocity.

J. Gerontol. a. Biol. Sci. Med. Sci. 53: M33-38.

**Thut, G., Schultz, W., Roelcke, U., Nienhusmeier, M., Missimer, J., Maguire, R.P. & Leenders, K.L. (1997)**

Activation of the human brain by monetary reward.

Neuroreport 8, 1225-1228.

**Tomberg, C. (1999)**

Finger kinaesthesia: cognitive electrogenesis to attended joint input.

Neuroreport: 10: 2475-2450.

**Vallbo, A.B. (1974)**

Afferent discharge from human muscle spindles in noncontracting muscles. Steady state impulse frequency as a function of joint angle.

Acta Physiol. Scand., 90: 303-318.

**Visser, J. & Geuze, R.H. (2000)**

Kinaesthetic acuity in adolescent boys: a longitudinal study.

Dev. Med. Child Neurol., 42: 93-96.

**von Campenhausen, C. (1981)**

Die Sinne des Menschen.

Thieme Verlag, Bd. I.

**von Holst, E. (1954)**

Relations between the central nervous system and the peripheral organs.

Br. J. Anim. Beh., 2: 89-94.

**Wahrig (1997)**

In: Wahrig-Burfeind (Hrsg.): Deutsches Wörterbuch.

Bertelsmann Lexikon Verlag, 6.Auflage.

**Weber, E. (1846)**

Der Tastsinn und das Gemeingefühl.

In: R. Wagner (Hrsg.). Handwörterbuch der Physiologie. Leipzig: Voss.

**Wei, J.Y., Kripke, B.R. & Burgess, P.R. (1986)**

Classification of muscle spindle receptors.

Brain Res., 370: 119-126.

**Weiller, C., Jueptner, M., Fellows, S., Rijntjes, M., Leonhardt, G., Kiebel, S., Müller, S., Diener, H.C. & Thilmann, A.F. (1996)**

Brain representation of active and passive movements.

Neuroimage, 4: 105-110.

**Werkhoven, P. & Koenderink, J.J. 1991**

Visual processing of rotary motion.

Percept. Psychophys., 49: 73-82.

**Wiesendanger, M. & Miles, T.S. (1982)**

Ascending pathway of low-threshold muscle afferents to the cerebral cortex and its possible role in motor control.

Physiological Reviews, 62: 1234-1270.

**Wise, A.K., Gregory, J.E. & Proske, U. (1996)**

The effects on muscle conditioning on movement detection thresholds at the human forearm.  
Brain Res., 735: 125-130.

**Woolsey, C.N., Chang, H.T. & Bard, P. (1947)**

Distribution of cortical evoked potentials evoked by electrical stimulation of dorsal roots in Macaca mulatta.  
Fed. Proc., 6: 230.

**Zeki, S.M. (1978)**

Functional specialisation in the visual cortex of the rhesus monkey.  
Nature, 274 (5670): 423-428.

**Zihl, D., von Cramon, Y. & Mai, N. (1983)**

Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage.  
Brain, 106: 313-340.

---

Am Zustandekommen dieser Dissertation trugen u. a. bei:

Aufbau des „Digitab“-Labors	Susanne Kiesow
und erste Vorversuche	Jaqueline Turowsky
Elektronische Werkstatt	Ralian Goldenberg
Mechanische Werkstatt	Horst Dabrowsky
Programmierung Versuchssteuerung mit ca.	Michael Wildenauer
10.000 GFA-Basic-Zeilen für den Atari Mega STE	Christian Schäfer
Konvertierungsprogramme Atari - PC	Olaf Lahl
	Michael Wagner
Hilfe bei der Datenübertragung Atari - PC	Jonas H. Müller
Hilfe bei der Literaturbeschaffung	Rita Gusek
28.440 gültige Bewegungsaufnahmen	
für die Experimente 1, 2 und 3	28 Versuchspersonen
Personelle und materielle Ausstattung	Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf Institut für Physiologische Psychologie II

Ich danke auch für die Unterstützung durch die zahlreichen hier nicht aufgeführten Personen.  
Nicht zu vergessen: Frau Ilse Fallmann, Sekretariat des Instituts für Physiologische Psychologie II.  
Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Krauth für seine konstruktive inhaltliche Kritik und seine Beratung bezüglich der statistischen Auswertung.  
In besonderer Weise verbunden fühle ich mich mit meinem Doktorvater, Herrn Prof. E.R. Wist.

Danke

---